

Trabajo Fin de Grado

Diseño de herramienta con Scilab para la optimización de
centrales mini-hidroeléctricas

Design of a computer tool with Scilab for the optimization of
mini-hydroelectric plants

Autor/es

Néstor Alonso Lira Ramos

Titulación

Grado en Ingeniería eléctrica

Director/es

José Antonio Domínguez Navarro

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

Año 2019

Memoria

MEMORIA

Abstract.....	3
Introducción y revisión bibliográfica.....	3
Metodología.....	4
Proceso de cálculo.....	4
Cálculo de la Inversión Inicial y los flujos de caja.....	6
Cálculo Económico.....	7
Datos de entrada.....	8
Fuentes de datos hidrográficos.....	8
Datos de Entrada.....	8
Introducción de datos de entrada.....	9
Modelado.....	10
Conducción del fluido de trabajo.....	10
Análisis de caudales.....	11
Pérdidas por conducción.....	12
Selección del diámetro.....	14
Golpe de Ariete.....	14
Rendimiento de la turbina.....	16
Elección del tipo de turbina.....	18
Evaluación económica de las soluciones obtenidas.....	19
Algoritmo de optimización del diseño.....	20
Descripción del algoritmo genético.....	20
Resultados.....	23
Descripción de los casos evaluados.....	23
Azud de Xerta y el paso del Rio Ebro por Tortosa.....	23
Descripción de los resultados.....	24
Conclusiones.....	28
Referencias.....	28

ANEXO

Fichero "GUI_Qe.sce"	30
Diseño de la interfaz	30
Cuadros de diálogo para la obtención de la Altura del Salto y Longitud de tuberías.	31
Valores que aparecerán por defecto, en la interfaz, a la par de los rótulos.....	31
Lectura de valores que aparecen en la interfaz	32
Lectura del fichero que contiene los datos de caudales y rendimientos de las turbinas	32
El algoritmo de optimización	32
Selección del Caudal turbinado	33
Fichero "GUI_funciones.sci"	36
Función del Diámetro de Fahlbusch.....	36
Función del número de Reynolds	36
Función del coeficiente de fricción de Darcy.....	36
Función de las pérdidas por fricción.....	36
Función de las pérdidas por fricción para array	36
Función de la velocidad del flujo.....	36
Función de pérdidas por singularidades	37
Función del Caudal turbinado.....	37
Función del cálculo de potencia.....	37
Función del Rendimiento de la turbina.....	37
Función del VAN.....	37
Función Objetivo. Cálculo de la Energía anual producida.....	38
Función de costes de Obra civil	38
Función de costes de tubería forzada.....	38
Función de coste de la turbina	38
Función de costes de Sistema Eléctrico	39
Función de coste Total	39
Datos del fichero Excel.....	39
Caudal diario	39
Rendimiento de la turbina	41
Caudal mínimo técnico	41
Cálculo de Costes	42

Abstract

En este trabajo se describirá el funcionamiento de una herramienta con la que se obtendrá una pre-valoración de la viabilidad económica de un proyecto de una central mini-hidraulica. Se parte de los datos la altura del salto y del caudal diario promedio de los años comprendidos entre 2005 y 2015, así mismo se suponen conocidas propiedades de los materiales que constituyen el sistema de conducción, serán tuberías de acero. El programa será descrito de forma cualitativa y posteriormente en los anexos se describirá detalladamente el código con el que ha sido programada la herramienta. El lenguaje empleado para su realización está basado en la Herramienta Scilab. También se ha implementado una interfaz gráfica en donde podrán ser modificados algunos datos de entrada, y en donde se visualizará los resultados. El programa se basa en un algoritmo genético de optimización que a través de un proceso iterativo nos dará los mejores resultados para el Caudal de Equipamiento de la turbina y el tipo de turbina. Posteriormente se calculará el Diámetro de la turbina según la fórmula de Fahlbusch, y se calcularán los resultados económicos y el VAN.

Introducción y revisión bibliográfica.

La energía del movimiento de los ríos era utilizada antiguamente para accionar molinos harineros, este mismo principio se utilizará posteriormente para la generación de energía eléctrica. Con la aparición de los generadores eléctricos ha sido posible la conversión del movimiento generado por las corrientes de agua en Energía eléctrica. “A finales del siglo XIX, la energía hidroeléctrica se convirtió en una fuente para generar electricidad. La primera central hidroeléctrica se construyó en Niagara Falls en 1879”. [1]

Se consideran fuentes renovables de energías aquellas que en el horizonte temporal del ser humanos se pueden considerar como inagotables como pueden ser la Energía de la radiación solar, La energía motriz de las mareas, el movimiento de un río, el viento, entre otras, que pueden transformarse en energía eléctrica. La explotación de estas fuentes se caracteriza por ser fuentes de energía limpia, es decir, que la emisión de gases contaminantes es prácticamente nula.

La energía a partir del aprovechamiento de la circulación del agua es una de las energías más rentables económicamente, y el ser humano tiene bastante experiencia en su explotación. Esto ha permitido que las centrales de energía hidroeléctrica sean unas de las más fiables y rentables económicamente.

En los países desarrollados se dan situaciones en las que no es posible la construcción de nuevas centrales, porque en las ubicaciones donde es factible su instalación, ya han sido instaladas centrales de generación. En estos casos convendría instalar componentes nuevos para aumentar la eficiencia, su producción de energía y disminuir los costes de mantenimiento.

En las zonas rurales de países menos desarrollados, en donde no tienen acceso a la electricidad, se podría plantear la posibilidad de realizar proyectos para la instalación de minicentral, es decir, de potencia menor a 10MW, en donde exista una fuente de agua que se pudiera aprovechar. De forma que se puedan sustituir técnicas rudimentarios e insalubres por la utilización de artefactos, que funcionen con energía eléctrica (cocinas eléctricas, bombeo de agua, entre otras).

Es necesario realizar una valoración de la factibilidad y del presupuesto que podría requerir un proyecto, de forma que se ejecute en las condiciones óptimas. El potencial energético del agua en movimiento depende fundamentalmente de la altura del salto de agua, que será lo que producirá la presión en la entrada del sistema de generación, y del caudal del fluido que circula a través del sistema. Pueden existir ubicaciones geográficas donde será más rentables que otras instalar una central hidroeléctrica.

Realizar un estudio económico y técnico previo al proyecto sobre una determinada ubicación es de gran importancia para conocer la rentabilidad que podría llegar a tener, y así se pueda asegurar el retorno de una inversión y convencer a los inversionistas de que están realizando una buena inversión de su capital.

Hoy en día tenemos disponibles ordenadores que son capaces de realizar cálculos con una rapidez y complejidad sin precedentes en la historia. Por esta razón ha surgido la posibilidad de realizar simulaciones de los sistemas, y conocer resultados antes de la ejecución del proyecto. De esta manera,

se pueden realizar nuevos proyectos con el objetivo de optimizar la inversión, maximizar la producción energética o también mejorar las instalaciones de las centrales hidroeléctricas ya existentes.

Ha habido trabajos previos en los que se han desarrollado herramientas de análisis numérico para calcular la producción de energía, costes de mantenimiento y operación como es el caso de HYPER. HYPER es una herramienta desarrollada por investigadores de la Universidad de California en Irvine. Esta herramienta ha sido programada en MATLAB, la cual utiliza un algoritmo evolutivo que permite al usuario maximizar la producción de energía de plantas de agua fluyente, así como el beneficio neto, realizando una optimización del diámetro de la tubería forzada, el tipo de turbina y la configuración, serie o paralelo de las turbinas.[2]

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos desarrolló en 1993, para uso privado, HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), el cual es un Software que se encargaba de optimizar sistemas híbridos de generación de energía. En 2009 se empezó a comercializar el Software en todo el mundo. [3]

En este trabajo hemos desarrollado una herramienta informática, que incorpora un optimizador con algoritmo genético, con el cual obtendremos el valor óptimo de unas variables de decisión que definiremos para los cuales la generación eléctrica es máxima en el periodo de un año hidrológico. Las variables de decisión serán El tipo de Turbina y el caudal de equipamiento de la turbina.

Esta herramienta informática aporta la posibilidad de hacer un estudio ágil y con resultados sencillos de interpretar para la instalación de nuevas centrales. Se puede utilizar también para fines didácticos, y mostrar a los usuarios el potencial hidroeléctrico que tiene una determinada ubicación geográfica, así como el efecto que tienen los distintos parámetros de una central o minicentral, en la producción energética y su rentabilidad a través del VAN.

Metodología

Proceso de cálculo

Primeramente, se explicará a través de un diagrama de flujo las operaciones seguidas para calcular de manera teórica la energía producida en un año, así como el Beneficio de la comercialización de la Energía eléctrica.

Para explicar el funcionamiento del programa nos basaremos en unos datos genéricos de caudal diario en un año hidrológico y los datos de los rendimientos de las turbinas que se considerarán (Francis, Kaplan, Pelton). Los datos utilizados para explicar el programa se podrán ver en el Anexo.

Estos datos de caudal diario y rendimiento de turbina han sido recogidos un fichero Excel, cuya ruta se definirá dentro del código programado. Con la ruta de la ubicación del fichero Excel, podremos a través de funciones de Scilab, leer el fichero, y seguidamente obtener los datos de Caudal y rendimientos para que puedan ser tratados por el programa.

Serán conocidos el Salto útil y el caudal, ya que serán datos de entrada. La variable que buscaremos será el Diámetro de la tubería, este influirá en las pérdidas de carga y en la Energía producida. El material de la tubería será definido por el usuario a través de la rugosidad absoluta y el módulo de Young, estos serán datos de entrada, pero se ha incorporado valores por defecto que corresponden al acero.

El caudal turbinado será el resultado de filtrar los caudales diarios para que no sea mayor que el Caudal de Equipamiento, ni menor al Caudal mínimo técnico, además se tendrá en cuenta el Caudal ecológico o de servidumbre.

En esta etapa donde se filtrarán los caudales para obtener el caudal turbinado, ya se conoce el Caudal de Equipamiento óptimo y el Caudal mínimo técnico, que corresponde a un tipo de turbina, que han sido obtenidos a través del proceso iterativo de optimización.

En el diagrama podremos observar las principales fórmulas empleadas en los procesos de cálculo de la Energía.

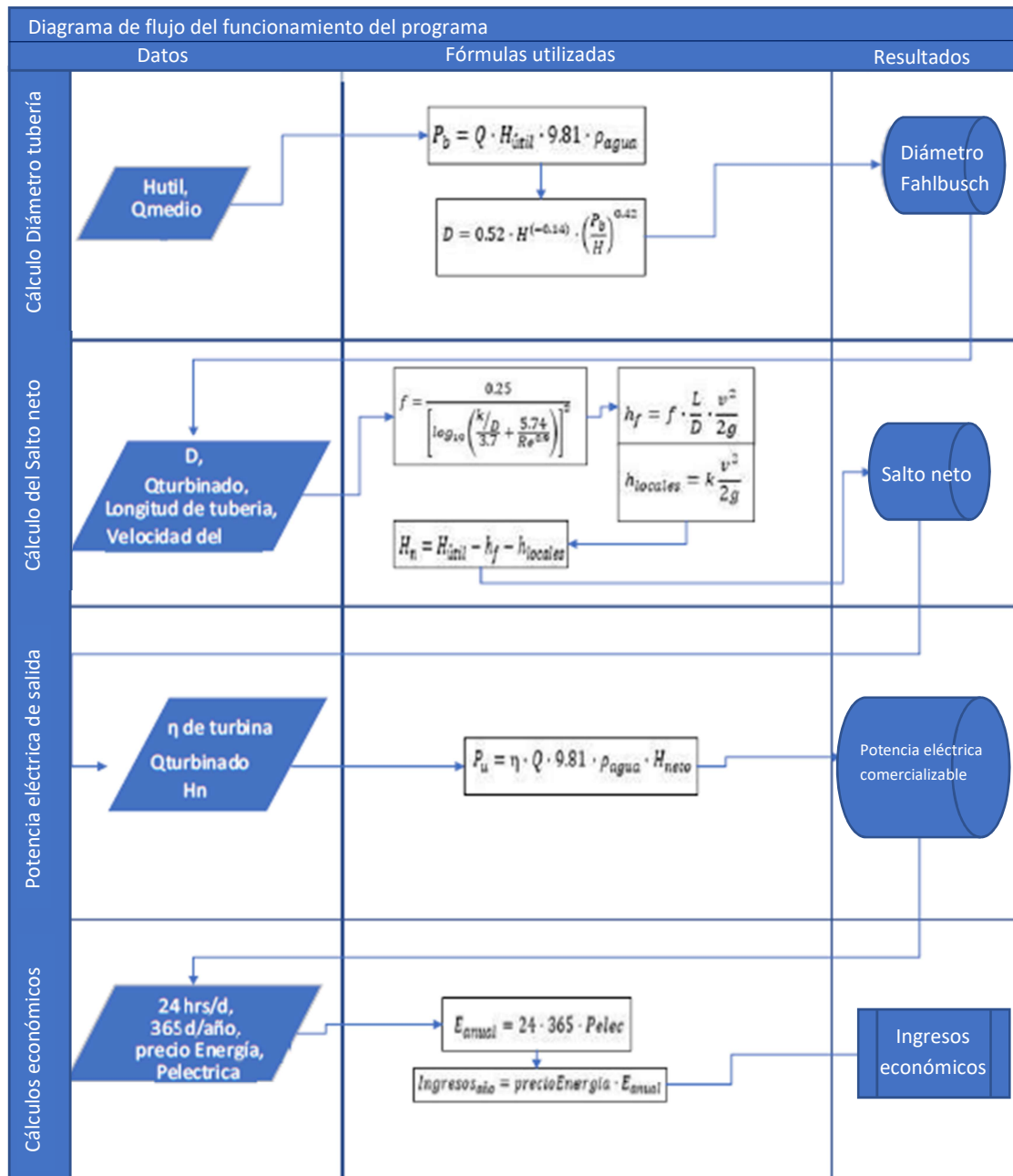


Ilustración 1 Diagrama de flujo del proceso de cálculo de la Energía y los ingresos en un año

Otros datos necesarios se pedirán al ejecutar el programa mediante un cuadro de diálogo, estos son el número de conductos o tuberías que se considerarán, la longitud y el desnivel de los conductos. Esta información se obtiene mediante estudios topográficos del terreno, que no serán cuestión de estudio en este trabajo. También se solicitará al usuario el tiempo de cierre de válvula, de esa forma podremos calcular el Golpe de Ariete. Durante la ejecución del programa, se podrá ver en la interfaz de usuario, una gráfica que tendrá representado el cálculo de golpe de ariete según Micheaud y según Jouguet.

El programa calcula un Diámetro basándose en la fórmula de F.E. Fahlbusch, que será descrita en detalle en el apartado de conducción del fluido de trabajo. Esta fórmula da como resultado una aproximación al diámetro que se debe instalar para obtener la mayor producción de energía. [4]

Conocido el diámetro, el programa calculará las pérdidas por rozamiento del fluido que es función del número de Reynolds, que depende del caudal que circulará, de la rugosidad absoluta en las paredes del conducto, para esto se utilizará el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach y la fórmula homónima. También se tendrán en cuenta las pérdidas producidas por la válvula, a través del coeficiente de pérdidas, estas pérdidas se engloban dentro de las pérdidas locales. Si sumamos las pérdidas por rozamiento y las pérdidas locales, se obtendrán las pérdidas de carga totales.

Teniendo calculadas las pérdidas, se realizará la siguiente resta aritmética para conocer el salto neto que será el que se tomará de referencia para calcular la potencia generada por la turbina. El salto neto es igual al salto útil (diferencia de altura entre la cámara de carga hasta el cuarto de máquinas) menos las pérdidas de carga.

$$H_n = H_{\text{útil}} - h_f - h_{\text{locales}} \quad (\text{ec. 1})$$

Cabe señalar que el salto útil será constante y depende de la geometría de la conducción, sin embargo, las pérdidas de carga serán calculadas para el caudal turbinado correspondiente a cada día del año hidrológico.

De la misma forma la potencia útil generada será función del caudal turbinado y del salto neto.

En este paso ya habremos conocido la potencia generada en cada día del año hidrológico. Consideraremos un periodo diario de funcionamiento de la central hidráulica de 24 horas, de esta forma podremos calcular la energía en kWh producida en un día. Conocida la energía producida cada día, podremos saber la energía producida en un año.

La energía producida en un año la multiplicaremos por el precio de la energía, que se considerará de 0.0055 €/kWh y de esa forma, obtendremos los ingresos anuales por la explotación.

Cálculo de la Inversión Inicial y los flujos de caja

Para el cálculo del desembolso inicial de la inversión se han utilizado las fórmulas empíricas que ha desarrollado el IDEA (Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía):

Costes de los distintos elementos en una central hidroeléctrica

Coste del Sistema Eléctrico General	$C_{se} = 180000 \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + e^{2 \cdot \left(1 - \frac{P}{3600} \right)}} \right)$	(ec.2)
Coste Transformador de potencia	$C_{trafo} = 183000 \cdot \left(1 - e^{-\frac{P}{6000}} \right) + 2000$	(ec. 3)
Coste Generador Síncrono	$C_{gen} = 467000 \cdot \left(1 - e^{-\frac{P}{6500}} \right)$	(ec. 4)
Coste Turbina Kaplan	$C_{TKaplan} = 90000 \cdot Hu^{0.2} \cdot Qe^{0.4}$	(ec. 5)
Coste Turbina Francis	$C_{TFrancis} = 90000 \cdot Hu^{0.2} \cdot Qe^{0.5}$	(ec. 6)
Coste Turbina Pelton	$C_{TPelton} = 90000 \cdot Hu^{0.25} \cdot Qe^{0.45}$	(ec. 7)

Tabla 1 Fórmulas empíricas de los costes de los elementos de una central hidroeléctrica

Con estas fórmulas se podrá obtener el coste de instalación de la central, el cual tomaremos como el desembolso inicial del proyecto. Posteriormente calcularemos los flujos de caja como el producto del precio de la energía por la energía anual generada. Los años de vida útil y la tasa de interés son dos

parámetros que solicitaremos al usuario, sin embargo, se incluyen valores por defecto de 30 años y una tasa de 12%.

Datos de entrada	
H salto(m)=	10
Rugosidad Abs=	0.0000457
Modulo de Young=	9.000D+08
Tiempo anulacion Caudal=	3
Longitud Azud (m)=	310
Altura Azud (m)=	6
Longitud C.Deriv.(m)=	20
DATOS ECONOMICOS	
Tasa descuento(%)=	12
Vida Util (años)=	30
Precio Energia(€/kWh)=	0.0055
Resolver	
Resultados	
Diametro Fahlbuch(m)=	1.933765
Caudal equipamiento Qe=	5.5824232
T.Turbina (F=1,K=2,P=3)	3
E. Generada(MWh/año)=	958.13653
Potencia Max(MW)=	0.4050118
Beneficio(€)=	5269.7509
VAN=	39577.357

Ilustración 2 Datos de entrada y salida como aparecen en la Interfaz gráfica

Cálculo Económico

Para poder realizar el cálculo del VAN necesitaremos cuantificar la Inversión inicial y los flujos de caja anuales. Para simplificar consideraremos que la inversión inicial consiste fundamentalmente en el coste de la Instalación. Y los flujos de caja consistirán fundamentalmente en el resultado de comercializar (vender) la energía a un precio de 0.0055€/kWh.

Se ha realizado el cálculo del VAN para una situación dada, a continuación mostraremos la curva de VAN-Qe, que hemos incluido en la interfaz, que reflejará la variación del VAN para un rango de Caudales de Equipamiento.

Para el cálculo del VAN hemos utilizado la fórmula (8):

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad (\text{ec.8})$$

I_0 es el valor de la inversión inicial

F_t es el flujo de caja anual

k es la tasa de interés

n es el número de años de vida útil de la instalación

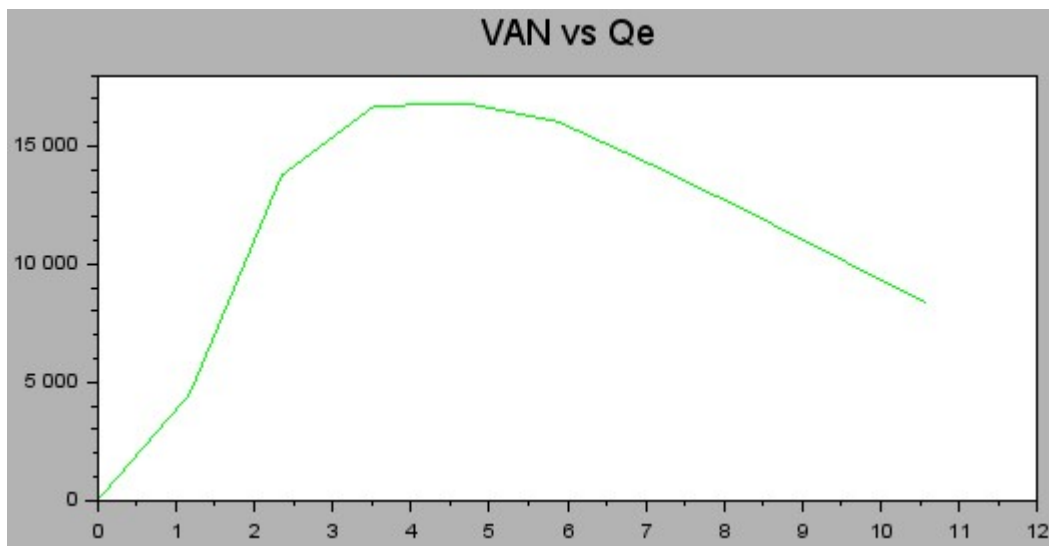


Ilustración 3 Curva de Van-Qe

Datos de entrada.

Fuentes de datos hidrográficos

Desde la página web de las Confederaciones Hidrográficas regionales se encuentran disponibles al público los datos históricos de caudal y desnivel de los ríos en España. La Confederación delegada de la cuenca hidrográfica del río Ebro es la CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro). Datos como el nivel y el caudal son recogidos a través de Estaciones de Aforo, estas estaciones de medida se ubican en puntos estratégicos como cauces y canales, actualmente la red formada por las estaciones de aforo de la cuenca del Ebro consta de 322 puntos de control que realizan mediciones diarias del caudal y el nivel de los ríos, canales y embalses que forman parte de la cuenca [5].

Para desarrollar la explicación del modelado nos basaremos en unos datos del ejemplo explicativo en cuanto a Caudal y Altura del Salto, que será de 10 metros. Mas adelante pondremos a prueba el programa, y resolveremos un caso real, se trata del Azud ubicado en la localidad de Xerta, en la provincia de Tarragona, Comunidad autónoma de Cataluña.

Datos de Entrada

En este trabajo se han incorporado los datos de caudal diario en un fichero Excel (".xls"), también ha sido incluida Información sobre los rendimientos promedios típicos de cada tipo de turbina y Caudal mínimo técnico de cada tipo de turbina.

Otros datos necesarios como son la densidad del agua a Temperatura ambiente (997 kg/m³) o la aceleración de la gravedad (9.81m/s²) han sido incluidos directamente en el código como constantes.

Los datos de la Altura del salto y longitud de la tubería son solicitados al usuario al iniciar el programa mediante cuadros de diálogos. El material de la tubería ha sido definido directamente en el código a través del Módulo de Young y la rugosidad superficial absoluta. Se ha definido como material el Acero de clase ALFORM 960 M con un módulo de Young de 900 MPa y para el cual hemos considerado una rugosidad superficial absoluta de 0.0000457 m (valor típico). [7]

También calcularemos el techo de presiones en el golpe de Ariete, por tanto, también se necesitará el valor de la constante T, que es el tiempo de anulación de caudal (tiempo de cierre de la válvula), por defecto estableceremos un valor de 3 segundos, pero este valor podrá ser modificado en cualquier

momento durante la ejecución de la aplicación para realizar los cálculos utilizando el nuevo dato, al igual que todos los datos de entrada que se mostraran en la Interfaz.

Introducción de datos de entrada

El usuario tendrá a su disposición la Interfaz Gráfica que hemos programado, en donde podrá introducir datos de entrada, así como modificarlos, también podrá ver los resultados obtenidos.

Al inicializar el programa se le solicita al usuario mediante un cuadro de diálogo que introduzca los datos del número de tuberías con las que se contará.

La elección del número de tuberías se realiza después de haber hecho un estudio de tipo topográfico y se conozca la trayectoria más factible. Una vez introducido el número de tubería, al usuario se le solicitará que introduzca los datos de longitud y desnivel de las tuberías. Completando estos datos se conocerán la longitud total de la tubería y el salto útil.

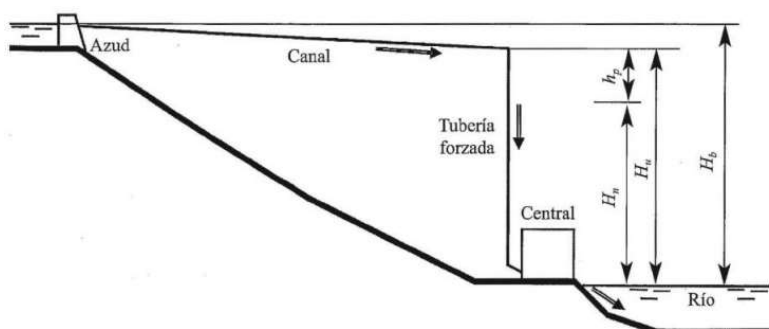


Ilustración 4 Esquema básico de una central de embalse (Diapositivas de clase Centrales Hidroeléctricas I)

En la imagen podemos ver los distintos saltos que se describen en el estudio de centrales hidroeléctricas, H_b , es el salto bruto, que corresponde a la diferencia de altura entre la fuente hídrica y el desagüe, donde se liberan las aguas turbinadas. H_u , es el salto útil que corresponde a la diferencia de altura entre la cámara de carga, (que conecta el fin del canal que obtiene el agua de la fuente y el inicio de la tubería forzada) y la turbina. h_p son las pérdidas totales que se calcularán, por una parte, las pérdidas por fricción, mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, y las pérdidas locales se calcularán a través del coeficiente de pérdida, estos dos tipos de pérdidas de carga son función del Caudal y del material de la tubería. Las fórmulas empleadas para calcular las pérdidas de carga aparecen en el diagrama de flujo que veremos a continuación. Por último, tenemos H_n , que es el salto neto con el cual se generará la potencia eléctrica, que corresponde a la diferencia del Salto útil menos las pérdidas de carga.

En este programa el usuario introducirá las propiedades del material de las paredes de la tubería forzada como son el módulo de Young, y la rugosidad absoluta del material con la que se fabricó, por tanto, la tubería será una variable conocida, además estos datos estarán disponibles a ser modificados en cualquier momento durante la ejecución del programa.

En una hoja Excel tenemos los datos de caudales diarios, podemos filtrar los caudales que pueden ser turbinados si hacemos pasar esta información a través de una función de Scilab que se encargue de este filtrado, de esta manera el caudal turbinado será otro dato conocido. El caudal turbinado será determinado por el caudal de equipamiento y el caudal mínimo técnico de la turbina, como explicaremos en el apartado de análisis de caudales.

El fluido de trabajo que consideraremos será agua de mar a una Temperatura de 25°C y 101kPa, que tiene una viscosidad de 0.00103 Pa·s [6]. Este dato ha sido implementado en el código y no se podrá modificar mientras el programa este ejecutándose.

Teniendo los datos de salto útil, el caudal, la longitud, el fluido de trabajo y el material de la tubería nos enfrentaremos a un problema de mecánica de fluidos de tipo iii. Necesitamos conocer un diámetro para terminar de dimensionar nuestra minicentral.

Modelado

Conducción del fluido de trabajo.

La conducción de un fluido de trabajo se puede plantear de diversas formas. Para el caso de tubería recta y cerrada, se conocen tres tipos de problemas, estos son: De tipo I, son aquellos en los que son conocidos caudal, Diámetro, Longitud, material de la tubería y las propiedades del fluido de trabajo, por tanto, la incógnita que se busca es el salto útil; los de tipo II, son aquellos en los que se conoce la Longitud, Diámetro, fluido, el material de la tubería y el salto útil, la incógnita que se quiere conocer es el Caudal. Los de tipo III, son aquellos en los que son dato el salto útil, el caudal, la longitud, el fluido y el material de la tubería, sin embargo, la incógnita que se deberá de calcular es el Diámetro.

En este programa se abarcarán problemas de tipo III, dispondremos de las variables conocidas, y el programa se encargará de calcular el Diámetro, mediante el criterio de Fahlbusch [4].

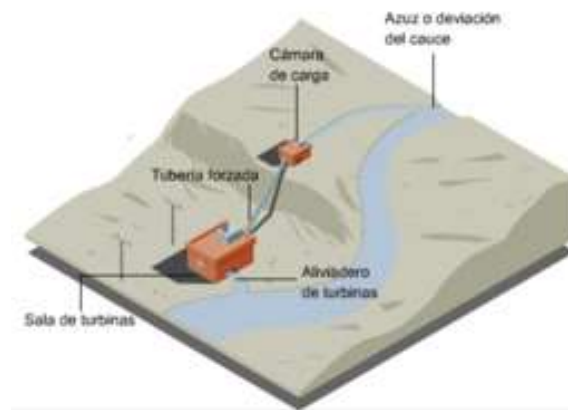


Ilustración 5 Esquema básico de una central de agua fluuyente (FUENTE: <https://ecovive.com/centrales-segun-la-afluencia-del-caudal/>)

En la imagen anterior podemos ver la distribución de los elementos básicos de una central hidráulica o minihidráulica. La central de la imagen es de agua fluuyente, esto quiere decir que no se almacena el agua en un embalse, en cambio se desvía una parte del caudal de un río, se turbiniza y aprovecha la energía cinética y finalmente se devuelve aguas abajo al río.

La derivación del cauce es una excavación artificial, por la que discurre el canal que transporta una porción del caudal total de la fuente hasta la cámara de carga. A continuación, está la cámara de carga, que es un depósito temporal de agua, cuya finalidad es homogeneizar el flujo de agua, en la entrada de la cámara de carga es común que se coloque una reja para eliminar objetos sólidos que no pueden formar parte del sistema, como pueden ser rocas, troncos o animales.

El agua que se obtiene de la tubería forzada debe ser suministrada de manera continua, ya que dentro de la tubería o de la turbina no puede haber burbujas de aire. Esto es debido a que por la elevada velocidad y el prolongado periodo de tiempo en el que operará nuestro sistema, no pueden existir burbujas de aire, ya que las burbujas de aire producen una erosión en los materiales, a este fenómeno se le conoce como cavitación. La cavitación reduce enormemente la vida útil tanto de la turbina como de las tuberías. Por esta razón la tubería debe ser llenada de agua antes de poner en operación la tubería, para que en ningún momento se produzca la cavitación.

La sala de turbinas es donde se localiza la turbina y el generador. El agua turbinada se devuelve al cauce a través del aliviadero o desagüe.

Análisis de caudales

Vamos a realizar el análisis de los caudales medios anuales, de forma que podremos observar cómo se comportará el caudal en los meses secos y húmedos. Los años secos y húmedos se deben de tener en cuenta en un análisis de sensibilidad para saber si la central será capaz de suministrar los flujos de caja requeridos durante un año seco.

En esta figura podemos ver los caudales a lo largo del año hidrológico, se ha de tener en cuenta que el año hidrológico comienza el 1 de Octubre y acaba el 30 de Septiembre.

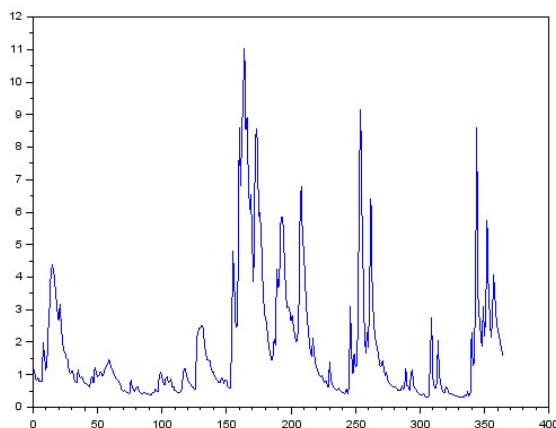


Ilustración 6 Curva de caudales diarios promedio

En la siguiente curva podemos observar el volumen de agua que se hace pasar por la turbina diariamente, al cual se le conoce como caudal turbinado.

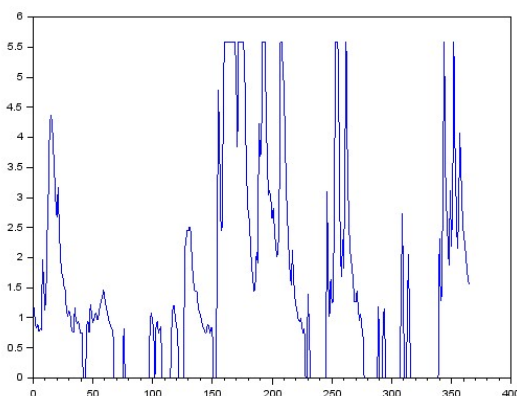


Ilustración 7 Curva de caudales turbinados diarios

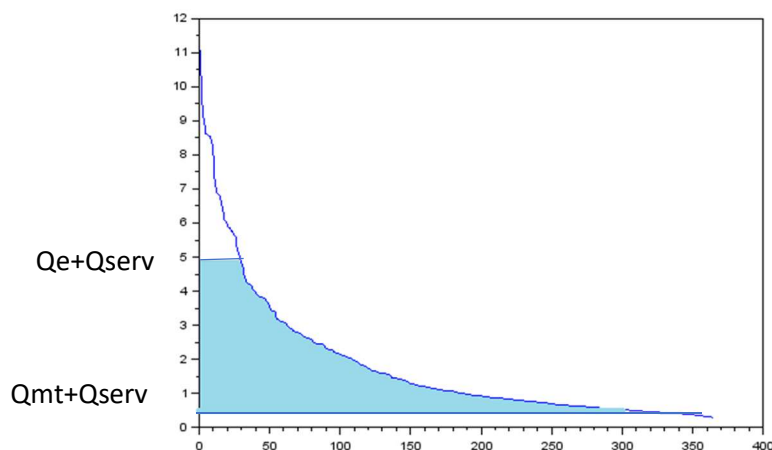


Ilustración 8 Curva de caudales clasificados de nuestro ejemplo

En esta figura aparece representada la curva de caudales medios clasificados, que nos servirá para saber el número de días que se tendrá en funcionamiento la turbina. En este caso el número máximo de días en los que se supera el caudal mínimo técnico, y significa que la turbina estará en funcionamiento, ronda los 300 días.

Para el caso de ejemplo de un salto de 10m y los caudales que se incluyeron en el fichero Excel, obtuvimos un caudal de equipamiento óptimo de 4.9814 m³/s y el tipo de turbina obtenido es Pelton, por tanto, el Caudal mínimo técnico que corresponde al 10% del caudal de equipamiento, es decir 0.49814 m³/s. En la figura hemos sombreado en color azul claro los caudales turbinable, teniendo en cuenta el caudal de servidumbre.

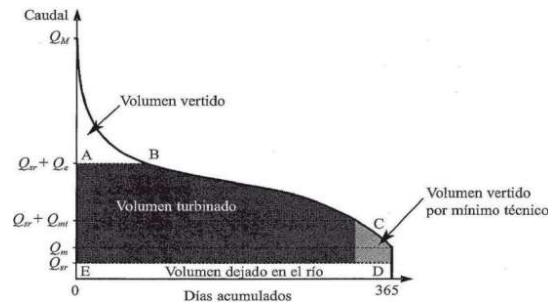


Ilustración 9 Caudales que delimitan el volumen turbinado en una curva de caudales clasificados

Para determinar el periodo anual en el cual la turbina estará en funcionamiento se deberá de tener en cuenta que la turbina será puesta en marcha, solo si el caudal que pasa por la turbina es mayor que este caudal mínimo técnico (Qmt), además asegurando de que habrá un caudal ecológico en el río. El caudal de servidumbre (Qsr) o caudal ecológico es el caudal que será dejado en el río, por razones medio ambientales. Además, la turbina se dimensiona con un caudal de equipamiento(Qe) o nominal, que será el máximo caudal que se podrá turbinar.

El rango comprendido entre el caudal mínimo técnico y el caudal de equipamiento será el caudal turbinado, asegurando en cualquier caso el caudal ecológico o de servidumbre. De esa forma podemos saber cuántos días en el año la central estará en produciendo energía.

Pérdidas por conducción

Conociendo el diámetro se tienen todos los datos necesarios para poder calcular las pérdidas de carga que existirán en las tuberías. Para calcular las pérdidas de carga por fricción en las tuberías se utilizará la ecuación de Darcy-Weisbach, que relaciona las pérdidas de carga en unidades de metros con la longitud, Diámetro y velocidad del fluido.

Para poder utilizar esta fórmula es necesario calcular f , que es el factor de fricción o coeficiente de Darcy-Weisbach. Este factor es función del Diámetro, y de la rugosidad superficial absoluta, así como del número de Reynolds.

El número de Reynolds se calculará para cada Caudal diario, por tanto, se ha implementado de forma que se calcule las pérdidas correspondientes al caudal turbinado cada día. La ecuación utilizada para obtener el número de Reynolds es la siguiente:

$$Re = Q \cdot \frac{4}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (\text{ec.9})$$

Q es el caudal turbinado

D es el diámetro del conducto

μ es la viscosidad del agua

El material para las tuberías considerado por defecto es acero, y se define mediante la rugosidad superficial absoluta y el módulo de Young que serán datos de entrada. La rugosidad superficial de la tubería es necesaria para calcular las pérdidas de carga por rozamiento durante la conducción del fluido. Por otro lado, el módulo de Young será utilizado, para calcular el espesor teórico de la tubería que será necesario conocer para saber la Longitud crítica del golpe de Ariete.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{ec. 10})$$

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{ec. 11})$$

f es el coeficiente de Darcy

k es la rugosidad superficial absoluta del material del conducto

Re es el número de Reynolds

L es la longitud total de las tuberías

v es la velocidad del fluido

g es la aceleración de la gravedad

D es el diámetro de la tubería

h_f es la pérdida de carga por fricción

Las pérdidas de carga locales son debidas a singularidades en los conductos, como pueden ser las válvulas, ensanchamientos bruscos, entrada-salida de depósitos u otros accesorios. Estas pérdidas de carga dependen de la velocidad del fluido y de la constante k que en este caso se denomina coeficiente de pérdida, que multiplicado por el cuadrado de la velocidad y dividido entre la aceleración de la gravedad por dos, nos dará las pérdidas de carga producidas por el accesorio. En este trabajo se ha considerado una válvula de coeficiente igual a 1,7.

$$h_{locales} = k \frac{v^2}{2g} \quad (\text{ec. 12})$$

k es coeficiente de pérdida de carga de la singularidad

v es la velocidad del fluido

g es la aceleración de la gravedad

Una vez obtenidas las Pérdidas de carga por conducción y locales en unidades de metro, el programa calcula el salto neto restando al Salto útil las pérdidas de carga por rozamiento y las pérdidas de carga locales.

$$H_n = H_{\text{útil}} - h_f - h_{\text{locales}} \quad (\text{ec. 13})$$

Con este salto neto (H_n) será posible calcular la potencia disponible, sin embargo, se deberá multiplicar por rendimiento de la turbina que será obtenido del Excel que contiene los datos de entrada, antes mencionado.

Selección del diámetro

La selección del diámetro es un problema que ha sido tratado y discutido multitud de veces a lo largo de la historia. Cuanto más grande sea el diámetro, menores pérdidas de carga tendrá, sin embargo, los costes se incrementan. Según la simplicidad que se quiera considerar se llega a obtener distintos resultados. Elegir el diámetro óptimo es importante para el correcto funcionamiento y la rentabilidad de la planta de generación. Por tanto, se deberá instalar un diámetro que concilie ambos aspectos de operación y costes. En 1982 F.E. Fahlbusch, propuso la siguiente fórmula para hallar el Diámetro óptimo en función de la altura del salto útil y de la potencia bruta [4].

$$D = 0.52 \cdot H^{(-0.14)} \cdot \left(\frac{P_b}{H}\right)^{0.42} \quad (\text{ec. 14})$$

H es el salto útil

P_b es la potencia bruta que es la máxima teórica que se puede llegar a obtener

D es el diámetro de Fahlbusch

Golpe de Ariete

La tubería forzada es el elemento de nuestra central que soportará las mayores presiones, ya que es donde circula el agua con la energía que moverá a la turbina, la altura proyectada sobre un eje perpendicular a la superficie terrestre corresponderá a nuestro salto útil, que es directamente proporcional a la potencia generada para un caudal determinado.

Además de estas presiones que corresponden al funcionamiento en régimen permanente, pueden aparecer sobrepresiones y subpresiones en periodos transitorios. Estos periodos transitorios pueden ser ocasionados por un cierre intempestivo de la válvula para eliminar el caudal que pase a la turbina, ya sea por averías o por maniobras programadas.

La longitud crítica nos ayuda a distinguir entre los dos casos posibles, el primer caso es cuando la longitud crítica es menor a la Longitud total de la conducción, $L_c < L$, en este caso tenemos una conducción larga, en donde se alcanzará el techo de presiones indicado por las fórmulas de golpe de ariete. En el otro caso cuando $L_c > L$ nos enfrentamos a una conducción corta, en donde no se alcanza el techo de presiones.

$$L_c = \frac{T \cdot c}{2} \quad (\text{ec.15})$$

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \cdot \frac{D}{e}}} \quad (\text{ec.16})$$

L_c es la longitud crítica

T es el tiempo de cierre de la válvula

c es la celeridad de la onda de presión

K constante adimensional igual a $10^{10}/K'$

K' el módulo elástico del material de la tubería

D es el diámetro de la tubería

e es el espesor de la tubería

Las sobrepresiones o subpresiones generadas por estos periodos transitorios pueden alcanzar valores máximos que deben ser soportados por la tubería o disipados de alguna forma, al fenómeno que genera estos valores de presión se le conoce como golpe de ariete.



Ejemplo de tubería dañada por el golpe de ariete

Copyright TLV CO.,LTD.

Ilustración 10 Ejemplo de afectaciones del golpe de ariete (FUENTE: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-waterhammer.html>)

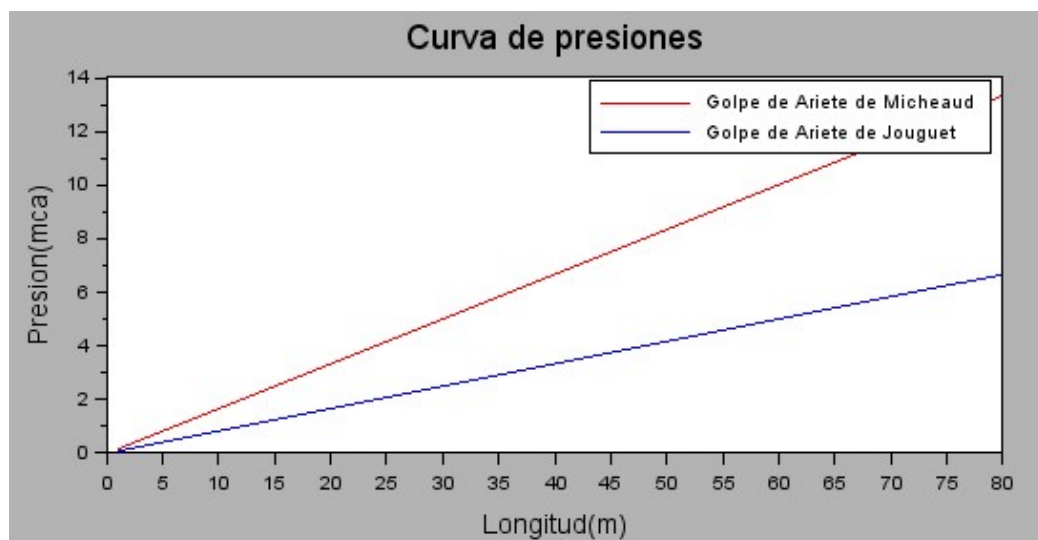


Ilustración 11 Distribución del techo de presiones en función de la longitud de la tubería

En esta gráfica podemos observar la distribución de los posibles golpes de ariete a lo largo de la longitud de 80m que hemos considerado en el ejemplo explicativo. Se han realizado los cálculos según la fórmula de Micheaud para el golpe de ariete y según Jouguet.

Una alternativa ante este fenómeno consiste en disipar la energía del golpe de ariete a través de una chimenea de equilibrio (o expansión abierta a la atmósfera), localizada en puntos estratégicos para que el techo de presiones de la curva no suponga ningún riesgo.

Rendimiento de la turbina

El rendimiento de una turbina es función del caudal que circula en la turbina y del caudal nominal de la turbina, es decir, del grado de carga. El grado de carga es la relación entre el caudal que circula dividido por el caudal de equipamiento o nominal de la turbina (Q/Q_e), si por la turbina circula el máximo caudal turbinable, el grado de carga será igual a 1.

Estos datos de rendimiento han sido incluidos en el Excel a través de valores discretos, es decir, que se trata de una lista de valores de rendimiento asociados a un grado de carga determinado. Por tanto, habrá posibles caudales en los cuales desconozcamos el rendimiento correspondiente, que se encuentren en valores intermedios a los que disponemos.

Para que podamos trabajar con cualquier grado de carga y de esa manera podremos conocer un rendimiento medio para cualquier grado de carga requerido por el usuario, se deberá hacer una interpolación. El Software Scilab incluye funciones que hacen posible la interpolación lineal, así como la interpolación cuadrática, esta última será la que se utilizará en nuestro programa.

El rendimiento de una turbina depende del tipo de turbina y del grado de carga al que opere. En la siguiente figura se muestran los datos de rendimiento empleados. En el eje de abscisas aparece el grado de carga (Q_i/Q_e), que depende del caudal turbinado y del caudal de equipamiento, en el eje de ordenadas tenemos el rendimiento.

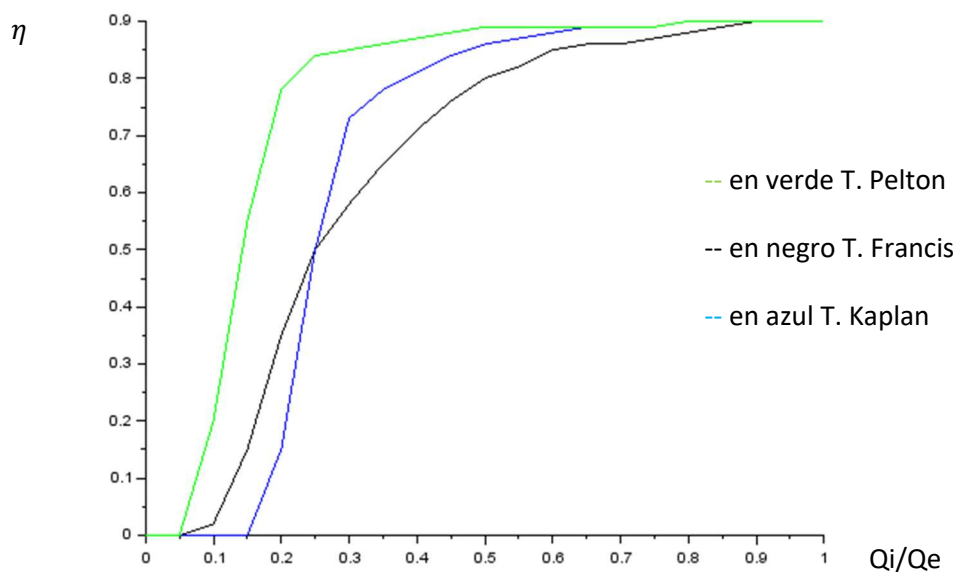


Ilustración 12 Curva de rendimiento de los 3 tipos de turbina

De esta forma obtenemos la potencia eléctrica generada, como:

$$P_u = \eta \cdot Q \cdot \rho_{agua} \cdot H_n \quad (\text{ec.17})$$

El caudal diario que se obtiene del Excel de datos de entrada es procesado, de forma que si se tiene en cuenta el caudal mínimo técnico y el caudal de servidumbre habrá días en los que no se ponga en funcionamiento la turbina. Con la fórmula anterior, obtenemos un array de potencias cuyos elementos estarán asociados a cada día del año hidrológico, además se tendrá en cuenta los días en donde no se pone en funcionamiento, para estos días el caudal turbinado es cero, por tanto, no se genera potencia.

El rendimiento de la turbina será calculado para un tipo de turbina en concreto. El tipo de turbina será determinado por el optimizador de algoritmo genético, que es una parte troncal en nuestro programa y será explicado en detalle más adelante. Una vez definido el tipo de turbina el programa trabajará con la curva de rendimientos correspondiente, que ha sido resultado de la interpolación.

Los tipos de turbina considerados son Francis, Kaplan y Pelton.

También se ha incluido en el fichero Excel, información de los caudales mínimos técnicos para los tipos de turbinas considerados, estos son, para las Turbinas Pelton se ha considerado un 10% del caudal de equipamiento, para las Kaplan un 25% y para las Francis un 40%.

Los datos de caudales incluyen la información correspondiente a cada día del año hidrológico, por este motivo tendremos un caudal asociado a cada día del año. De la misma forma, tendremos un rendimiento de la turbina asociado a cada día el año hidrológico. Estos rendimientos serán los que determinen la eficiencia de la turbina a lo largo del año.

En la siguiente figura podremos ver el rendimiento de la turbina a lo largo del año hidrológico. Esta curva de rendimientos ha sido realizada basándonos en los datos de caudales turbinados de nuestro fichero Excel, que será el que contenga los datos utilizados del ejemplo explicativo utilizado para explicar el funcionamiento del programa en los apartados anteriores.

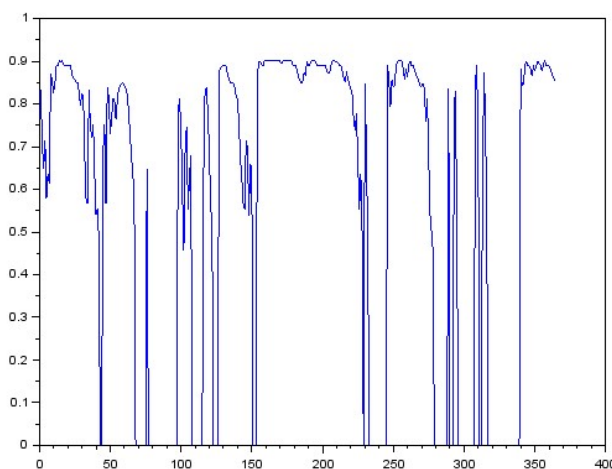


Ilustración 13 Rendimiento que tendrá la turbina a lo largo del año hidrológico

Por defecto, el programa incluirá datos de entrada que podrán ser fácilmente modificados por el usuario, estos son, el Tipo de turbina, Caudal de equipamiento o nominal de la turbina, módulo de Young del material de la tubería, rugosidad superficial absoluta de la tubería. También se tendrá datos de entrada para los cálculos económicos de la inversión, que serán explicados en el apartado de datos económicos.

En la siguiente figura podremos observar la Potencia diaria generada.

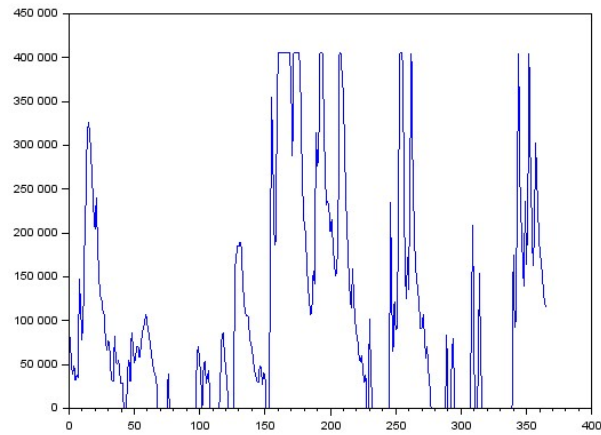


Ilustración 14 Curva de la potencia de salida diaria

Si multiplicamos esta potencia eléctrica por el periodo de funcionamiento diario que se tomará de 24 horas, obtenemos la energía diaria generada, en unidades de kWh. Posteriormente sumaremos las energías diarias, y se obtendrá la energía anual generada. La potencia máxima durante el año será la utilizada para dimensionar el generador eléctrico que será de tipo síncrono.

Elección del tipo de turbina

Según las condiciones de salto y caudal se podrá elegir entre los 3 tipos de turbinas, la turbina Pelton, son las más eficientes en saltos grandes y caudales pequeños, las turbinas Kaplan, son las más eficientes en saltos pequeños, pero de gran caudal, y las turbinas Francis, que son más aptas para condiciones de caudal y salto intermedias, coinciden en ciertas situaciones con los otros dos tipos de turbinas, la desventaja es que dispone de un caudal de mínimo técnico mayor, eso quiere decir que para su puesta en marcha necesita de un caudal mayor.

En la siguiente gráfica, facilitada por el fabricante de turbinas hidráulicas WEG, podemos ver gráficamente lo antes mencionado, esta relación entre la altura del salto y el caudal turbinado nos puede indicar la turbina que nos convendría instalar, así como las potencias nominales que tiene el fabricante en catálogo.

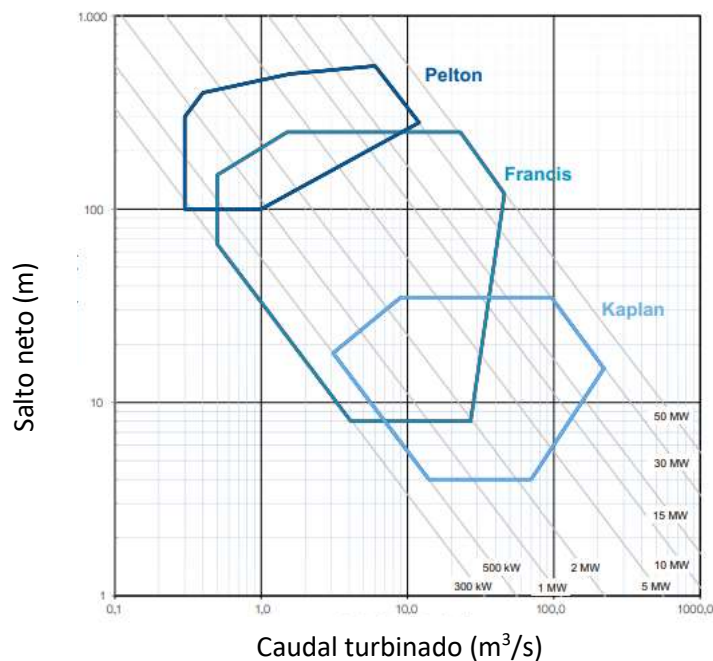


Ilustración 15 Diagrama de selección del tipo de turbina del fabricante WEG

En ciertas situaciones será necesario realizar cálculos matemáticos para elegir la turbina más apropiada, pero el programa se encargará de elegir el tipo de turbina mediante un proceso iterativo que será generado por el optimizador de algoritmo genético. Durante el proceso iterativo se asignará un tipo de turbina a cada interacción, al finalizar el proceso se obtendrá un valor óptimo de energía anual generada y el programa guardará el tipo de turbina con el cual se obtuvo este resultado de energía anual generada.

Además, el programa mostrará entre los resultados la potencia máxima, con la que se podrá seleccionar la potencia nominal de la turbina y del generador.

Evaluación económica de las soluciones obtenidas.

En este ejemplo explicativo hemos fijado en la función de optimización, que el programa considere el rango de Caudal de Equipamiento de 0 a 15 m³/s. Y hemos considerado el caudal diario del ejemplo explicativo y una altura de salto de 10m. Para el cálculo del VAN hemos tomado una tasa de 12% y 30 años de vida útil del proyecto. El precio de la energía está fijado a 0.0055 €/kWh.

En la siguiente gráfica podemos ver cómo evoluciona el Beneficio económico en función del Diámetro utilizado.

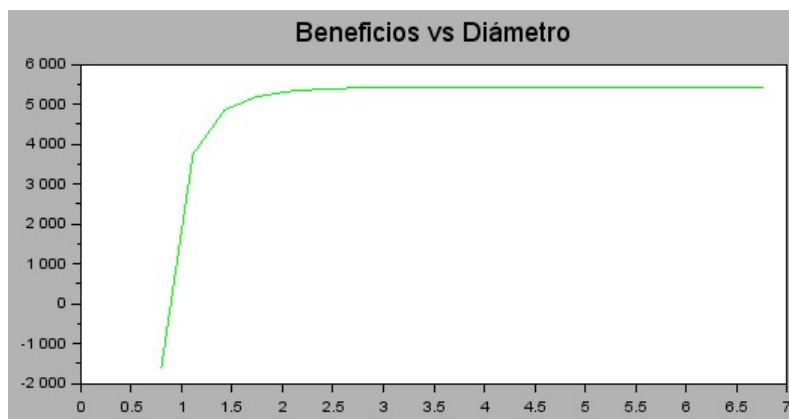


Ilustración 16 Curva de Beneficios en función del Diámetro de la tubería

A continuación, veremos la gráfica de VAN vs Diámetro, que es la que aparecerá implementada en la Interfaz.

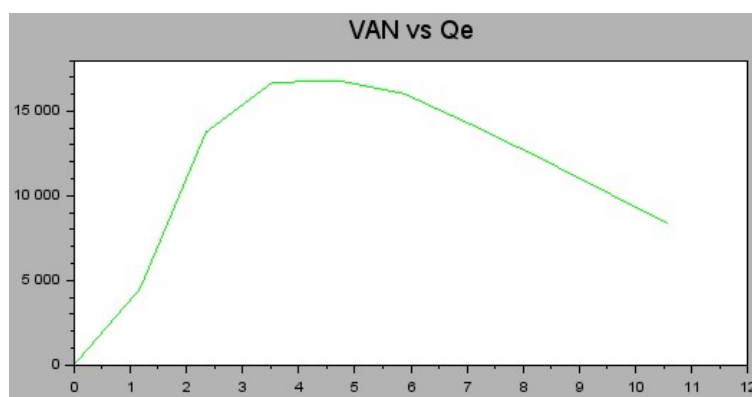


Ilustración 17 Curva de VAN en función del caudal de equipamiento

Algoritmo de optimización del diseño.

Descripción del algoritmo genético.

A continuación, se explicará el funcionamiento básico y la implementación del algoritmo que llevará a cabo la optimización.

Antes de implementar la función objetivo, se deberá de definir los parámetros de entrada de la función de optimización ("optim_ga"), estos parámetros iniciales se han definido en el fichero ".sce". Estos son:

"pop_size" que será el número de posibles valores que podrán tomar las variables de decisión.

"no_generation" que será el número de iteraciones que realizará el algoritmo.

"p_mut" es un parámetro que consiste en la mutabilidad de las variables de decisión

"p_cross" es un parámetro que define la probabilidad de convergencia de la solución

"Log" es un parámetro que permitirá observar el resultado de cada interacción en la consola de Scilab

Para la variable "param" se asignan distintas propiedades que definirán el comportamiento de nuestras variables de decisión. La propiedad "dimension" define el número de variables de decisión, en nuestro programa serán 2, el Caudal de Equipamiento(Qe) y un índice de la turbina que durante las iteraciones permitirá escoger el tipo de turbina y los datos de las turbinas que están incluidos en el fichero Excel. El Caudal de Equipamiento estará comprendido entre 0.01 y 15, el índice de la turbina entre 1 y 3.

```
29 pop_size = 100;
30 nb_generation = 10;
31 p_mut = 0.1;
32 p_cross = 0.7;
33 Log = %T;
34
35 param = init_param();
36 param = add_param(param, "dimension", 2);
37 param = add_param(param, "minbound", [0.01 1]);
38 param = add_param(param, "maxbound", [15 3]);
```

Ilustración 18

La variable "ga_f" es de tipo list, aquí introduciremos nuestra función objetivo y las variables que permanecerán fijas durante la interacción.

```
39 ga_f = list(CalcularEnergiaAnual, Qi, Qserv, H_salto);
40
41 [pop_opt, fobj_pop_opt, pop_init, fobj_pop_init] = optim_ga(ga_f, pop_size, nb_generation, p_mut, p_cross, Log, param);
```

Ilustración 19

Se ha utilizado la función proporcionada por Scilab denominado "optim_ga", esta función se encargará de realizar un proceso iterativo de optimización sobre una función objetivo que se define en el parámetro de tipo list "ga_f", aquí introduciremos nuestra función objetivo y las variables que permanecerán fijas durante la interacción resto de variables si serán modificadas por el algoritmo.

Durante el proceso iterativo se les asignarán valores aleatorios a nuestras variables de decisión, de forma que el resultado obtenido se irá mejorando consecutivamente, dentro del rango determinado por las variables de decisión. En las siguientes iteraciones se obtendrán valores de la variable de salida mejores, hasta alcanzar el límite de iteraciones, que hemos definido de 10 iteraciones.

Nuestra función objetivo será "CalcularEnergiaAnual ". Esta función objetivo dará como resultado la energía producida en un año. En el proceso iterativo se pretende minimizar un valor, sin embargo, a

nosotros nos interesa maximizar la energía producida, por tanto, se deberá añadir un signo negativo en el resultado, que será la energía anual producida. Como podemos observar en la figura, en la línea 27 de la función objetivo (“CalcularEnergiaAnual”), se incluye un signo negativo en la definición de la variable.

```

1 function [Eanual]= CalcularEnergiaAnual(x, Qi,Qserv,Hutil)
2     Qe=x(1);%x es el array con las variables de decision, x(1) es el Q de equipamiento
3     index_turbina=x(2);
4     index_turbina_aux = round(index_turbina);
5     %Leemos la hoja del fichero Excel y obtenemos los datos correspondientes a los rendimientos (y grado de carga) y caudal mínimo técnico.
6     [Value2,TextInd2] = xls_read(fd,Sheetpos(2));
7     rend = Value2(2:22,2:4);
8     Q_Qe = Value2(2:22,1);
9     Qmt_Qe = Value2(3,7:9);
10    %Definimos el caudal mínimo técnico
11    Qmt = Qe * Qmt_Qe(index_turbina_aux);
12    %Caudal turbinado
13    Qturbinado = CalcularCaudalTurbinado(Qi,Qe,Qmt,Qserv);
14    %Potencia bruta
15    Pbruta= CalcularPotencia(Qturbinado, Hutil);
16    %Rendimiento turbina
17    Rend_turbina = CalcularRendimientoTurbina(Qturbinado,Qe,Q_Qe, rend(:,index_turbina_aux));
18    %Rendimiento total
19    Rend_otros = 0.9;%Aquí se incluye el rendimiento de generador, multiplicadora y otros elementos menores.
20    Rend_total = Rend_turbina * Rend_otros;
21    %Potencia útil
22    Putil = Pbruta .* Rend_total;
23    %Energía diaria
24    Periodo_funcionamiento = 24;
25    Ediaria = Putil * Periodo_funcionamiento;
26    %Energía anual
27    Eanual = - sum(Ediaria);
28
29 endfunction;

```

Ilustración 20

Para poder definir una función en los lenguajes de programación más comunes, esta se debe de declarar como tal, y se debe de nombrar, además se deben de definir las variables de entrada y de salida. En nuestro caso las variables de entrada serán:

- “x” que es un array que incluye las variables de decisión (Qe y tipo turbina)
- “Qi” que es un array con los caudales diarios
- “Qserv” que es una constante y es el valor del caudal ecológico o de servidumbre
- “Hutil” es el salto útil considerado

La variable de salida es [Eanual], tal como declara en la línea 1, que corresponderá al valor de energía generado en el periodo de un año, calculado con los valores que contengan las variables de entrada.

Dentro de la función objetivo se realiza un filtrado de los caudales que no se turbinan, mediante el llamamiento de la función “CalcularCaudalTurbinado”, que será explicada en detalle en el anexo junto al resto de las funciones que se han definido en el código. Seguidamente se calculará un array, “Pbruta”, de valores de la potencia bruta correspondiente a cada día del año hidrológico. En la línea 17 se calculará un array de los rendimientos asociados a cada elemento, “Rend_turbina”, del array de los caudales que se turbinan durante el año.

El periodo de funcionamiento diario se ha tomado de 24 horas, y estará funcionando durante todos los días del año, es decir 365 días.

Para obtener la Energía anual, solo queda multiplicar el array “Pbruta” por el periodo diario de 24 horas por 365 días del año hidrológico. En este punto hemos obtenido un array con las Energías diarias, de forma que se deberá de hacer el sumatorio de cada elemento para obtener la Energía generada en un año.

Habiendo definido la función objetivo y los parámetros iniciales del optimizador, se procederá a lanzar el proceso iterativo mediante la función, “optim_ga”:

```
40 [pop_opt,fobj_pop_opt,pop_init,fobj_pop_init] = optim_ga(ga_f,pop_size,nb_generation,p_mut,p_cross,Log,param);
```

Ilustración 21

Durante la ejecución del proceso iterativo, en la consola se verán los resultados parciales de la optimización de la como se muestra en la siguiente figura:

```
optim_ga: iteration 1 / 10
min / max value found = -991835117.392084 / -819258069.584165
optim_ga: iteration 2 / 10
min / max value found = -991872307.405621 / -853599716.613506
optim_ga: iteration 3 / 10
min / max value found = -992864301.747743 / -974153471.066383
optim_ga: iteration 4 / 10
min / max value found = -992864301.747743 / -987876948.160350
optim_ga: iteration 5 / 10
min / max value found = -993280394.109813 / -990681652.853248
optim_ga: iteration 6 / 10
min / max value found = -993402935.229766 / -991835117.392084
optim_ga: iteration 7 / 10
min / max value found = -993406992.784976 / -992756549.944842
optim_ga: iteration 8 / 10
min / max value found = -993423592.835644 / -993121184.312609
optim_ga: iteration 9 / 10
min / max value found = -993423592.835644 / -993271143.590819
optim_ga: iteration 10 / 10
min / max value found = -993423592.835644 / -993346070.034821
```

Ilustración 22

Nos aparece el número de la interacción, y el número de iteraciones que hará el programa. “iteration 1/10” indica que es la primera interacción de un total de 10.

En la línea “min / max value found = -991835117.392084 / -819258069.584165” se muestran los resultados de la optimización, como vemos se trata de un rango de valores, que corresponde a la Energía anual producida durante el año hidrológico. Aparece con signo negativo por que el algoritmo hace una optimización al valor más pequeño posible, de forma que, para obtener el valor deseado de máxima energía generada, se ha añadido un signo menos.

Una vez terminado el proceso iterativo deberemos obtener el mejor resultado de entre todas las iteraciones a través del siguiente comando.

```
42 [fmin ,k] = min(fobj_pop_opt)
43 xmin = pop_opt(k)
```

Ilustración 23

Los valores óptimos de las variables de decisión que hemos definido (Qe y tipo de turbina), se guardarán en el array “xmin”. De forma que a partir de este momento podremos trabajar con los valores óptimos de caudal y con el tipo de turbina que se ha obtenido el resultado óptimo de Generación de Energía.

```
45 index_turbina=round(xmin(2))
46 Qe_opt=xmin(1)
```

Ilustración 24

El valor de caudal de equipamiento con el que obtendremos la máxima producción de energía es en torno a 5.

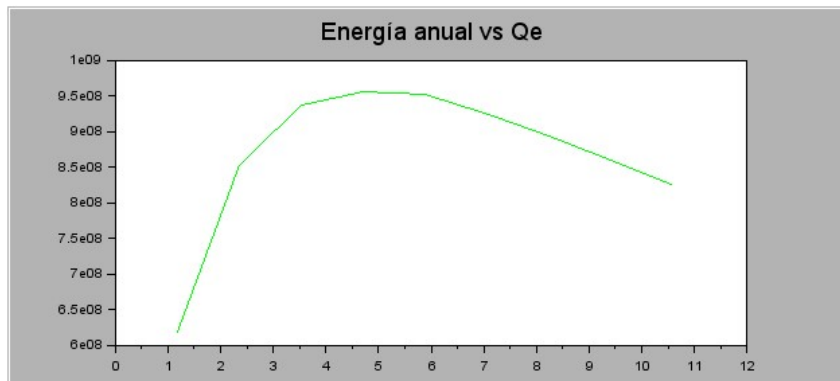


Ilustración 25

Resultados

En la siguiente gráfica podemos observar la interfaz mostrando los resultados que ha generado la aplicación

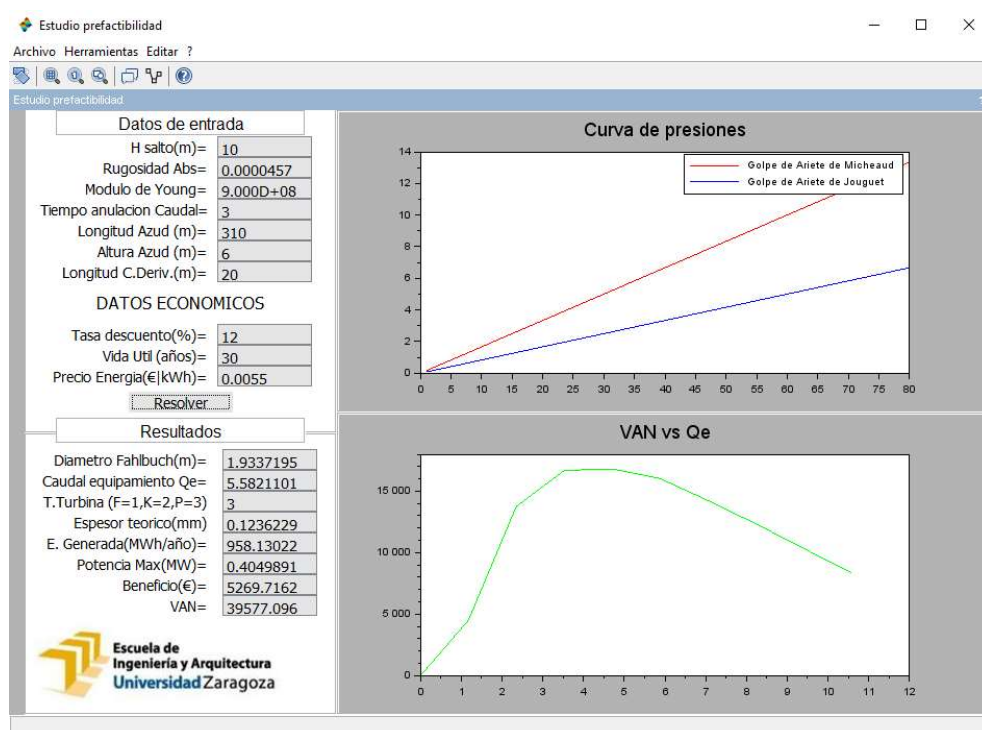


Ilustración 26

Descripción de los casos evaluados.

Azud de Xerta y el paso del Rio Ebro por Tortosa

El azud de Xerta es una obra arquitectónica cuya finalización data del siglo XV. Fue construido por ingenieros árabes, y el objetivo principal era por una parte suministrar agua a regadíos y además aprovechar la energía cinética del agua para accionar molinos harineros.

El azud tiene una longitud total de 310 m, 6 metros de altura y un perfil trapezoidal.

En el año 2002 se instaló una central hidroeléctrica apoyándose en la construcción de este azud. Esta central actualmente dispone de 18000 kW de potencia instalada, proporcionada por turbinas semikaplan, y un salto de 3.05 m. [8]

El rio Ebro en su paso por el azud tiene un caudal medio anual de 421.39 m³/s.[9]



Fecha de la imagen: may. 2017 Las imágenes pueden estar protegidas por derechos de autor.

Enric Gisbert

Foto - may. 2017

Ilustración 27 (FUENTE: Google Maps)

Descripción de los resultados.

Para estudiar el caudal del río Ebro en su paso por Xerta hemos obtenido los datos desde el año 2000 hasta el año 2015. Hacer un análisis de un rango lo suficientemente amplio, nos dará la información del comportamiento del río en años secos y húmedos. Como podemos observar en la siguiente grafica existen años en los que el caudal es superior a la media, también hay años en los que el caudal es menor.

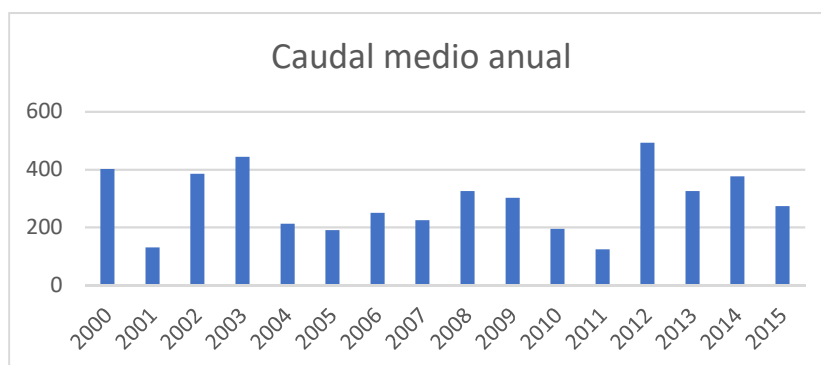


Ilustración 28 Caudal medio anual de los años 2000-2015

En la gráfica a continuación aparecen representados los caudales diarios promedios del río Ebro en su paso por Xerta, donde se diferencia claramente los meses secos y húmedos a lo largo del año hidrológico.

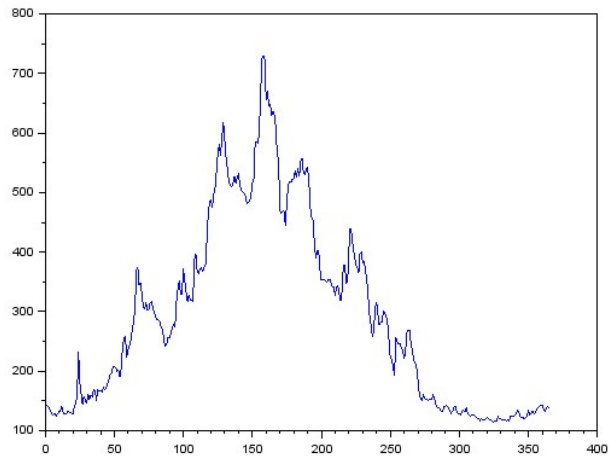


Ilustración 29 Caudal diario del paso del río Ebro por Xerta

El caudal de equipamiento para este caso ha sido de $602.598 \text{ m}^3/\text{s}$, el tipo de turbina óptimo es Pelton (tipo 3) y el Diámetro óptimo 16.3135 m .

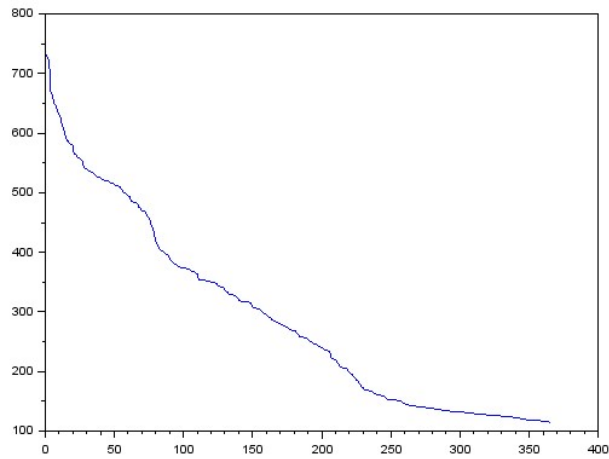


Ilustración 30 Curva de caudales clasificados del paso del río Ebro por Xerta

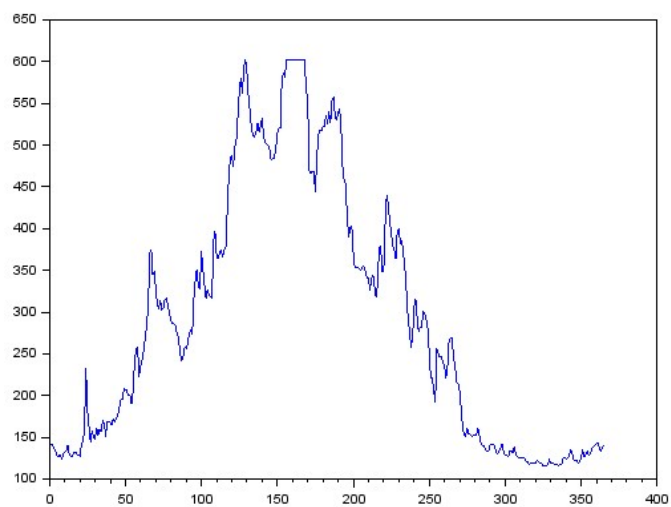


Ilustración 31 Curva de caudales turbinados del río Ebro en su paso por Xerta

Del mismo modo que en el ejemplo explicativo, hemos recogido los caudales diarios del río Ebro en su paso por el Xerta en un fichero Excel. Los datos de rendimiento según el tipo de turbina los hemos conservado, así como los datos de caudal mínimo técnico en función del Caudal de Equipamiento, Q_e . La altura del salto vamos a tomar 3.05 metros.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos correspondientes a los 3 tipos de turbina para un mismo caudal de equipamiento. Podemos observar que la Máxima energía se obtiene para turbinas Pelton, también resulta la que más beneficios nos aporta. El VAN nos indica que la mejor inversión sería instalando una turbina Pelton.

	Diámetro (m)	$Q_e(m^3/s)$	Energía anual producida(kWh/año)	Beneficio(€/año)	VAN
Turbina Francis	16.313	602.59	36377	200077.25	1600812.6
Turbina Kaplan	16.313	602.59	41454	228002.32	1827059.7
Turbina Pelton	16.313	602.59	50971	280342.31	2247297.1

Tabla 2

En las siguientes imágenes podemos ver los resultados obtenidos para cada tipo de turbina

Tipo de turbina 1 Francis

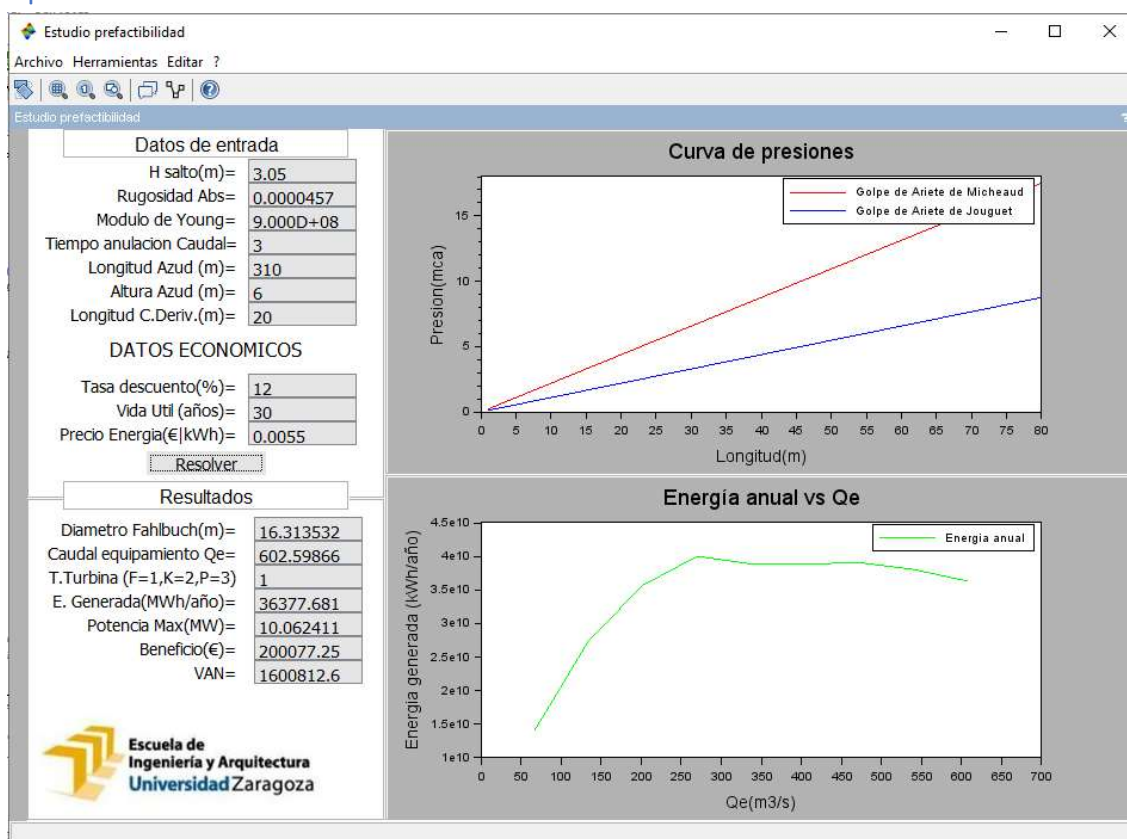


Ilustración 32 Interfaz de Usuario mostrando resultados para turbina Francis

Tipo de turbina 2 Kaplan

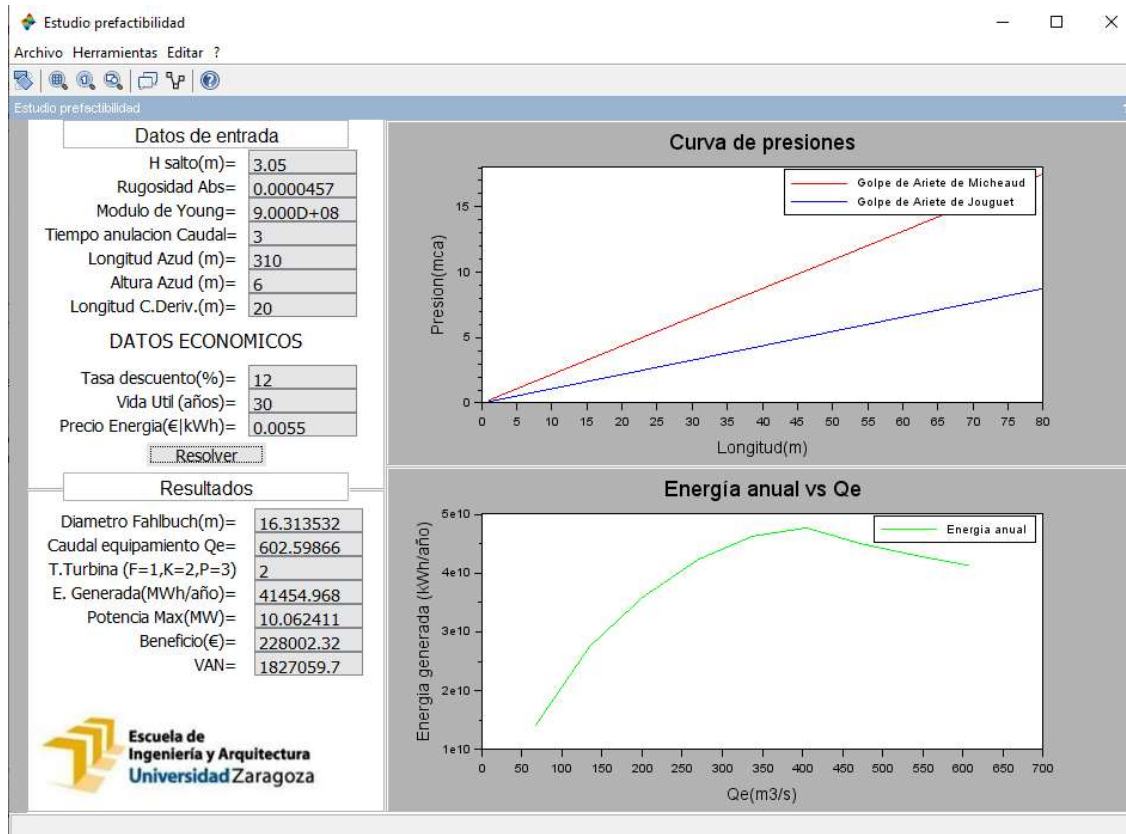


Ilustración 33 Interfaz de Usuario mostrando resultados para turbina Kaplan

Tipo de turbina 3 Pelton

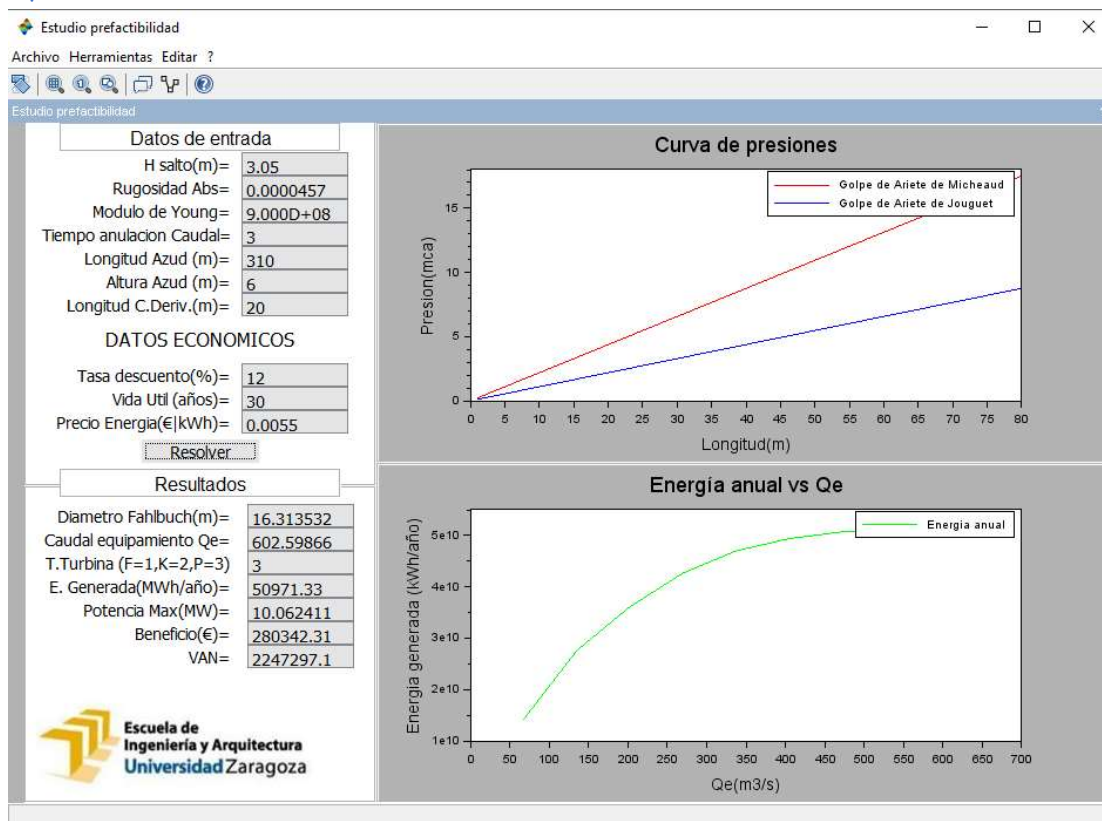


Ilustración 34 Interfaz de Usuario mostrando resultados para turbina Pelton

Conclusiones

Con esta herramienta se ha obtenido una aproximación de los costes y del VAN de la inversión. Resulta una herramienta bastante ágil, que incorpora un algoritmo de optimización que nos devuelve un rango de valores recomendados para el Caudal de Equipamiento y el tipo de turbina. Con la gráfica del VAN-*Q* se puede comprobar que el caudal de Equipamiento que genera la máxima energía es próximo al devuelto por el algoritmo.

Se ha calculado la energía anual producida y el VAN de los 3 diferentes tipos de turbina. El algoritmo de optimización nos ha indicado que la producción óptima se obtiene utilizando una turbina Kaplan (tipo 3). Los cálculos para los 3 tipos de turbina se realizaron para el mismo caudal de equipamiento obtenido por el algoritmo de optimización. Al hacer la comparación de los 3 resultados hemos podido comprobar que la máxima producción de energía de los 3 resultados corresponde a la turbina Kaplan (ver tabla 2).

Esta herramienta podría ser utilizada con fines docentes debido a su rapidez de cálculo y a que muestra resultados mediante una interfaz sencilla.

La potencia con la que se dimensionaría la turbina nos ha salido aproximadamente de 10MW, lo cual resulta comparable a la potencia real que se instaló en esta central de 18MW, ubicada en Xerta localidad de Cataluña.

Referencias

- [1] <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-hidroelectrica>
- [2] Yildiz, V., & Vrugt, J. A. (2019). A toolbox for the optimal design of run-of-river hydropower plants. *Environmental Modelling & Software*, 134.
- [3] <https://www.homerenergy.com/company/index.html>
- [4] Fahlbusch, F. E. (1982). Power tunnels and penstock: The economics re-examined. *International Water Power and Dam Construction*, 34(6)
- [5] <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=37945&idMenu=2167>
- [6] Mott, R. L. (2006). Mecánica de fluidos. sexta edición.
- [7] Catálogo comercial de la empresa ALFORM para tuberías serie M
- [8] El Azud de Xerta;Autores: Lorenzo Correa Lloreda;Localización: Cimbra: Revista del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas, ISSN 0210-0479, N.º 367, 2006, págs. 30-43
- [9] <https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/>
- Tapia, A., Millán, P., & Gómez-Estern, F. (2018). Integer programming to optimize micro-hydro power plants for generic river profiles. *Renewable Energy*, 126, 905.
- Cozorici, F., Vadan, I., Munteanu, R. A., Cozorici, I., & Karaissas, P. (2011). Design and simulation of a small wind-hydro power plant. 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP),
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (IDAE), & Ministerio para la Transición Ecológica. (2006). Minicentrales hidroeléctricas. Manuales De Energías Renovables, 6
- O. P. Rahi, & Gagnesh Kumar. (2014). Simulation studies for refurbishment and uprating of hydro power plants.

Anexo

En este anexo se describirá el código del fichero principal “GUI_Qe.sce” y las funciones utilizadas que están incluidas en el fichero “GUI_funciones.sci”.

En la siguiente figura podemos observar la interfaz que se ha implementado con los resultados obtenidos.

Los datos de entrada se podran modificar en cualquier momento y después de pulsar el botón “Resolver” el programa se pondra en marcha. Tras unos segundos, se habrá completado el proceso iterativo, y el programa mostrará los resultados y las gráficas.

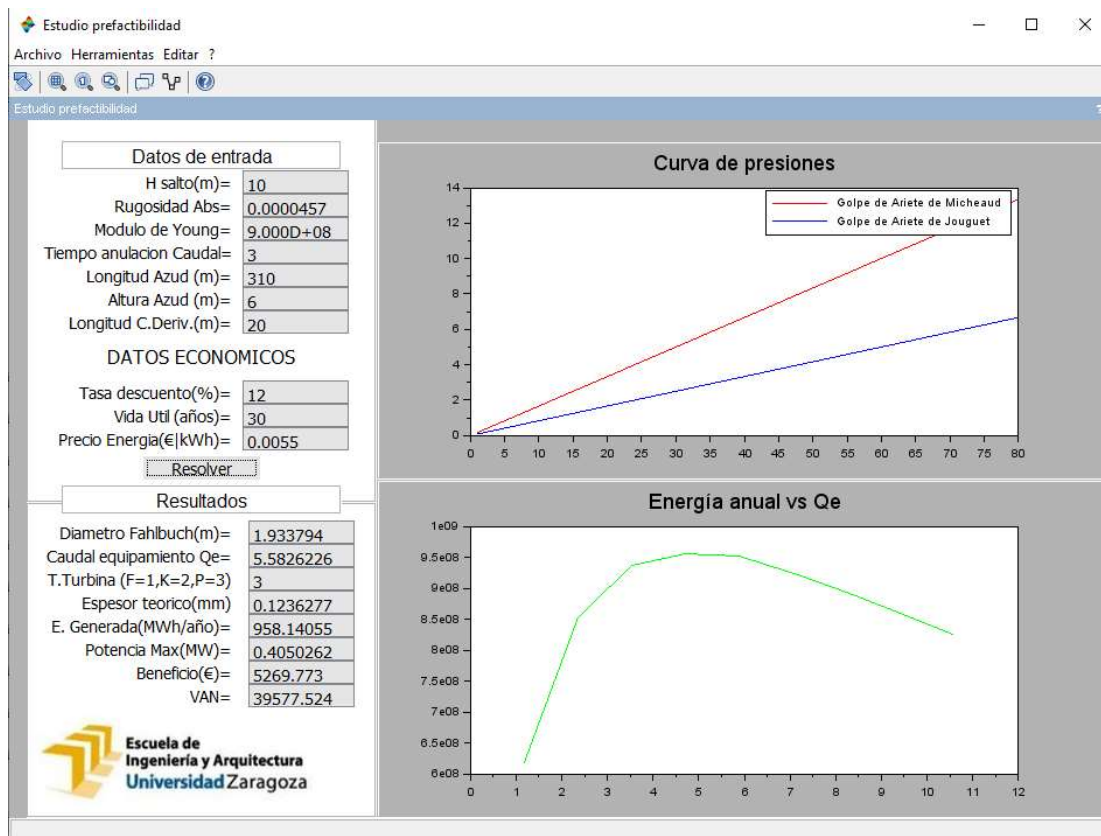


Ilustración 0-A Interfaz gráfica mostrando los resultados de la ejecución

Fichero “GUI_Qe.sce”

- La primera operación que ejecuta el programa consiste en ejecutar el fichero (“GUI_funciones.sci”) en donde hemos almacenado las funciones que llamaremos en este fichero principal (“GUI_Qe.sce”).

```
exec('GUI_funciones.sci');
```

Diseño de la interfaz

La interfaz consiste en dos partes, en el margen izquierdo se mostrará los datos de entrada y de salida. En el margen derecho aparecen las gráficas. El procedimiento para elaborar la interfaz ha consistido en definir las dimensiones que tendrá la interfaz, posteriormente se colocan 4 *frames* en las cuales se colocarán los datos de entrada, los resultados (salidas) y dos gráficas que son las que se muestran en la figura, Golpe de Ariete vs Longitud y Energía producida vs Qe. También se ha colocado un botón, “Resolver”, que pondrá en marcha el programa.

Sobre la frame de Datos de entrada se colocan los rótulos (“*labels1*”) que indican las variables cuyos valores (“*values1*”) se mostrarán a su lado.

Otra tarea que se realizará será mostrar los resultados obtenidos, para lo cual se mostrará los valores en las ubicaciones correspondientes, que inicialmente aparecerá un cero.

- A continuación, declararemos unas variables que tendrán la única finalidad de dimensionar la interfaz gráfica.

```
global margin_x margin_y; global cuadro_w cuadro_h plot_w plot_h;
// Dimensionamos la ventana Grafica
cuadro_w = 300; cuadro_h = 550; plot_w = 600; plot_h = cuadro_h; margin_x = 15; margin_y = 15;
axes_w = 3*margin_x + cuadro_w + plot_w; axes_h = 2*margin_y + cuadro_h;
GUI = scf(100001); GUI.background = -3; GUI.figure_position = [205 195]; GUI.figure_name = gettext("Estudio prefactibilidad"); GUI.axes_size = [axes_w axes_h];
```

- En esta parte se diseña el interior de la ventana, en donde se definen 4 zonas (*frames*), una será para ubicar los datos de entrada, otra para los datos de salida y las otras 2 serán para las dos graficas que representaremos.

```
//diseñamos la ventana
gui1 = cuadro_w; gui1o = 255; l1 = 30; l2 = 160; l3 = 200;
uicontrol("parent", GUI, "relief", "groove", "style", "frame", "units", "pixels", "position", [margin_x 270 cuadro_w 350], "horizontalalignment", "center", "background", [1 1 1], "tag", "cuadro_control");
uicontrol("parent", GUI, "style", "text", "Relief", "groove", "string", "Datos de entrada", "units", "pixels", "position", [30+margin_x 555 cuadro_w-60 25], "fontname", "defaultfont", "fontunits", "points", "fontsize", 16, "horizontalalignment", "center", "background", [1 1 1], "tag", "title_cuadro_control");
uicontrol("parent", GUI, "relief", "groove", "style", "frame", "units", "pixels", "position", [margin_x 0 cuadro_w 270], "horizontalalignment", "center", "background", [1 1 1], "tag", "cuadro_control");
uicontrol("parent", GUI, "style", "text", "Relief", "groove", "string", "Resultados", "units", "pixels", "position", [30+margin_x 260 cuadro_w-60 25], "fontname", "defaultfont", "fontunits", "points", "fontsize", 16, "horizontalalignment", "center", "background", [1 1 1], "tag", "title_cuadro_control", "background", [1 1 1]);
uicontrol("parent", GUI, "style", "text", "string", "DATOS ECONOMICOS", "position", [l3-120, gui1-8*20+gui1o+5-15, 165, 20], "horizontalalignment", "right", "fontsize", 16, "background", [1 1 1]);
```

- Estas dos frames serán en las que aparecerán las gráficas del Golpe de Ariete-longitud y VAN-Qe

```
my_cuadro3 = uicontrol("parent", GUI, "relief", "groove", "style", "frame", "units", "pixels", "position", [315 0 630 290], "horizontalalignment", "center", "background", [1 1 1], "tag", "cuadro_control");
my_cuadro4 = uicontrol("parent", GUI, "relief", "groove", "style", "frame", "units", "pixels", "position", [315 290 630 290], "horizontalalignment", "center", "background", [1 1 1], "tag", "cuadro_control");
```

- Aquí colocamos el botón que pondrá en marcha el programa, con su respectivo “handle” que será “syscompute”

```
//ubicamos el boton
huibutton = uicontrol(GUI, "style", "pushbutton", "Position", [115 290 100 20], "String", "Resolver", "BackgroundColor", [.9 .9 .9], "fontsize", 14, "Callback", "syscompute");
```

Cuadros de diálogo para la obtención de la Altura del Salto y Longitud de tuberías.

- Habiéndose ejecutado la interfaz con las frames se procederá con los cuadros de diálogo, en donde se solicitará al usuario que introduzca datos como el número de tuberías, la longitud y el desnivel. Estos datos serán guardados en la matriz “datos”

```
txt1 = ["Introduzca el número de tuberías: "];
//x_mdialog
sig = x_mdialog(' ',txt1,['1']);
tuberias=0;
tuberias = evstr(sig(1));//numero de tuberias
default_input_matrix = string([80, 10];zeros(tuberias-1,2));
labelsv = 'tuberia '+string(1:tuberias);
labelsh = ['Longitud', 'Desnivel'];
datos = x_mdialog('Introduzca Longitud de las tuberias y el Desnivel: ',labelsv, labelsh, default_input_matrix);
```

- Con los datos recogidos en “datos” los convertiremos de texto a valores y sumaremos los desniveles para obtener el Salto útil y la longitud total de la conducción.

```
//Obtenemos el Salto total y la Litud de la conduccion
H_salto=0; L=0;datosN=evstr(datos);
for i=1:tuberias
H_salto=H_salto+evstr(datosN(i,2));
L=L+evstr(datosN(i,1));
End
```

Valores que aparecerán por defecto, en la interfaz, a la par de los rótulos.

- A continuación, se definirán los valores por defecto que tendrán las variables de entrada y salida que aparecerán en la interfaz antes de ejecutar el programa. Podemos observar que la Altura del salto (“H_salto”) ya la conocemos y se mostrará por pantalla este valor conocido.

```
//Nombramos los valores de entrada y salida en la GUI
labels1 = ['H salto(m)=', 'Rugosidad Abs=', 'Modulo de Young=', 'Tiempo anulación Caudal=', 'Longitud Azul (m)=', 'Altura Azul (m)=', 'Longitud C.Deriv.(m)=', 'Tasa descuento(%)=', 'Vida Útil (años)=', 'Precio Energía(€/kWh)=', 'Diámetro Fahlbuch(m)=', 'Caudal equipamiento Qe=', 'T.Turbina (F=1,K=2,P=3)', 'Espesor teórico(mm)', 'E. Generada(MWh/año)=', 'Potencia Max(MW)=', 'Beneficio(€)=', 'VAN='];
values1 = [H_salto,0.00004572, 9000000000 ,3,310,6,20,12,30, 0.0055,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
```

- El siguiente bucle se dedicará a colocar en la interfaz los rótulos (“labels1”) y los valores (“values1”) correspondientes

```
//Colocamos en pantalla los valores de entrada y salida
for k=1:size(labels1,2)
if(k<=7) then
uicontrol("parent",GUI, "style","text","string",labels1(k), "position",[l1,guih1-k*20+guih1o,l2,20], "horizontalalignment","right", "fontsize",14, "background",[1 1 1]);
uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(values1(k)), "position",[l3,guih1-k*20+guih1o,91,20], "horizontalalignment","left", "fontsize",14, "background",[.9 .9 .9], "tag",labels1(k));
elseif(k>7 & k<=10)then
uicontrol("parent",GUI, "style","text","string",labels1(k), "position",[l1,guih1-(k+2)*20+guih1o,l2,20], "horizontalalignment","right", "fontsize",14, "background",[1 1 1]);
uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(values1(k)), "position",[l3,guih1-(k+2)*20+guih1o,91,20], "horizontalalignment","left", "fontsize",14, "background",[.9 .9 .9], "tag",labels1(k));
elseif(k>10) then
uicontrol("parent",GUI, "style","text","string",labels1(k), "position",[l1,guih1-(k+5)*20+guih1o,l2,20], "horizontalalignment","right", "fontsize",14, "background",[1 1 1]);
uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(values1(k)), "position",[l3+5,guih1-(k+5)*20+guih1o,91,20], "horizontalalignment","left", "fontsize",14, "background",[.9 .9 .9], "tag",labels1(k));
end
end

//Colocamos logo EINA
uicontrol('style','image','string','C:\Users\Nestor\Desktop\TFG\logo.jpg','position',[20 5 240 85]);
```

- La función “syscompute” será la que ejecute todos los cálculos necesarios para obtener los resultados, cada vez que se dé clic en el botón “Resolver” cuyo handle es “syscompute” y que hemos definido anteriormente.

```
g=9.81;
function syscompute(datos)
// obtenemos los valores de entrada
```


Lectura de valores que aparecen en la interfaz

- El usuario tendrá la posibilidad de modificar los valores de entrada que aparecen en la interfaz y que se tengan en cuenta en el momento de ejecutar el programa. Las siguientes líneas se dedican a obtener los valores de la interfaz.

```
H = findobj("tag", labels1(1)); H_salto=evstr(H.string);
RugAbs = findobj("tag", labels1(2)); intRugAbs = evstr(RugAbs.string);
modE = findobj("tag", labels1(3)); E = evstr(modE.string);
T_valvula = findobj("tag", labels1(4)); T = evstr(T_valvula.string);
Long_azud = findobj("tag", labels1(5)); Lazud = evstr(Long_azud.string);
Altura_azud = findobj("tag", labels1(6)); hazud = evstr(Altura_azud.string);
Long_canal = findobj("tag", labels1(7)); Lcanal = evstr(Long_canal.string);
tasaVAN = findobj("tag", labels1(8)); inttasaVAN = evstr(tasaVAN.string);
VidaUtil = findobj("tag", labels1(9)); intVidaUtil = evstr(VidaUtil.string);
precioEn = findobj("tag", labels1(10)); intprecioEn = evstr(precioEn.string);
```

Lectura del fichero que contiene los datos de caudales y rendimientos de las turbinas

- Procederemos a leer el fichero Excel en donde guardamos los datos de caudal diario, rendimientos y caudal mínimo técnico de las turbinas.

```
//aquí obtenemos el caudal
%%%Leer archivos excel
dir1='C:\Users\Nestor\Desktop\TFG\datos_hidro.xls';
//open Excel stream
[fd,SST,Sheetnames,Sheetpos] = xls_open(dir1);
//Caudal de servidumbre (10% del caudal medio)
[Value1,TextInd1] = xls_read(fd,Sheetpos(1));
```

- Guardamos los valores de caudal en el array Qi y declaramos el caudal de servidumbre “Qserv”.

```
Qi = Value1(2:366,2);
Qmean = mean(Qi);
Qserv = 0.10 * Qmean;
```

El algoritmo de optimización

- El algoritmo de optimización nos devolverá los valores óptimos de las variables de decisión, que serán el caudal de equipamiento y el tipo de turbina.

Vamos a inicializar el algoritmo de optimización introduciendo los parámetros “pop_size” que será el número de individuos (valores posibles de las variables de decisión) en cada generación, y “nb_generation” define el número de generaciones o iteraciones que se realizarán. Tras cada generación se guardarán los individuos que generaron el mejor resultado, para que en la siguiente generación se mejore el resultado de la función objetivo.

```
//Aqui ponemos en marcha el optimizador
// algoritmo de optimización para encontrar el Qe optimo
```

```
pop_size = 100;
nb_generation = 10;
p_mut = 0.1;
p_cross = 0.7;
Log = %T;
```

- Tendremos 2 variables de decisión, Qe que acotaremos la búsqueda entre [1,15] y el tipo de turbina que utilizaremos un redondeo de valores aleatorios entre 1 y 3, de forma que las posibilidades sean 1, 2 y 3 (Francis, Kaplan y Pelton respectivamente).

```
param = init_param();
param = add_param(param,"dimension",2);
param = add_param(param,"minbound",[1 1]);
param = add_param(param,"maxbound",[15 3]);
```

- ga_f es el listado en donde incluimos a la función objetivo “CalcularEnergiaAnual” y las variables de entrada de la función que queremos que se mantengan invariantes.

```
ga_f = list(CalcularEnergiaAnual,Qi,Qserv,H_salto);
```

- Aquí se ejecuta la función de optimización

```
[pop_opt,fobj_pop_opt,pop_init,fobj_pop_init] = optim_ga(ga_f,pop_size,nb_generation,p_mut,p_cross,Log,param);
```

- Una vez que se complete la función de optimización guardaremos los valores de las variables de decisión que den el resultado optimizado (“index_turbina”, “Qe_opt”). Se guarda el mínimo ya que el programa minimiza el valor buscado de la función objetivo, por lo que ha sido necesario incluir un signo negativo dentro de la función objetivo “CalcularEnergiaAnual”

```
[fmin ,k] = min(fobj_pop_opt);
xmin = pop_opt(k);
index_turbina=round(xmin(2));
Qe_opt=xmin(1);
```

- Se van a leer del fichero Excel los valores de rendimientos y caudal mínimo técnico de la turbina que hemos elegido al realizarse la optimización:

```
//Read first data sheet Turbinas
[Value2,TextInd2] = xls_read(fd,Sheetpos(2));
rend = Value2(2:22,2:4);
Q_Qe = Value2(2:22,1);
Qmt_Qe = Value2(3,7:9);
Qmt = Qe_opt * Qmt_Qe(index_turbina);
```

Selección del Caudal turbinado

- Se filtrarán los valores de caudal diario de obtendremos un array con el caudal diario que pasar por la turbina. Esa función será explicada en detalle cuando expliquemos el fichero (.sci)

```
Qturbinado = CalcularCaudalTurbinado(Qi,Qe_opt,Qmt,Qserv);
```

- Hacemos el cálculo del Diámetro según Fahlbusch

```
//Aqui dimensionamos el Diametro Segun Fahlbusch
//calculamos el diametro
D=Fahlbusch(H_salto,max(Qturbinado),0.9);
```

- Calculamos el espesor mínimo teórico “esp” de la tubería

```
Presion_Pa=997.0751*g*H_salto;
esp=(Presion_Pa*D)/(2*E*0.85);
```

- Calculamos el salto neto “Hn”

```
L=0;Friccion=[];PerdTotales=[];BENEFICIO=0;ingresos=0;costes=0; Eanual=0;//Para inicializar las variables en cada Ejecucion
for i=1:tuberias
    L=L+datosN(i,1);
end
Friccion=calculoperd(Qturbinado,D,intRugAbs,0.00103,L);
Vel=Vel_Flujo(D,Friccion,L);
Locales=Perd_locales(Vel);//Perdidas locales valvula
PerdTotales=Friccion+Locales;//mca
Hn=H_salto-PerdTotales;//Calculo de la altura Neta
GA_Jouguet=[];GA_Micheaud=[];
```

- Calculamos el golpe de ariete con las fórmulas de Jouguet y Micheaud

```
for i=1:L
    GA_Jouguet(i)=i*max(Vel)/(g*T);
    GA_Micheaud(i)=2*i*max(Vel)/(g*T);
End
```

- Mediante la función “CalcularRendimientoTurbina” obtenemos un array con los rendimientos a lo largo del año hidrológico

```
//Rendimiento total
Rend_turbina = CalcularRendimientoTurbina(Qturbinado,Qe_opt,Q_Qe, rend(:,index_turbina));
Rend_otros = 0.9;
Rend_total = Rend_turbina * Rend_otros;
```

- La potencia disponible diaria se obtiene con la función “CalcularPotencia”, si multiplicamos por el rendimiento obtenemos la potencia útil diaria

```
//Potencia útil
Pdisp= CalcularPotencia(Qturbinado, Hn);
Putil = Pdisp .* Rend_total;
```

- El valor máximo del array “Putil” será el que definirá la potencia de la turbina y el generador, este valor lo mostraremos por pantalla
 $P_{max} = \max(P_{util});$
- La Energía diaria se obtiene multiplicando la potencia por las horas diarias en las que trabaja la turbina.

```
//Energía diaria
Periodo_funcionamiento = 24;
Ediaria = Putil * Periodo_funcionamiento;
```
- Finalmente, la Energía Anual se obtiene como el sumatorio de los elementos del array “Ediaria”

```
//Energía anual
Eanual = sum(Ediaria);
```
- Habiendo obtenido la Energía anual, a continuación, se harán los cálculos económicos. Los ingresos serán el producto del precio de la Energía “intprecioEn” y la Energía anual “Eanual”. Los costes se calcularán con las fórmulas empíricas obtenidas del IDAE a través de la función “CosteTotal” que será descrita en detalle cuando se expliquen.

```
//Resultados Economicos
Beneficios=0;Coste_Total=0;
Dolares_IngresadosAnuales=(1/1000)*intprecioEn*Eanual;//dolares precioE
Coste_Total=(1/1000)*CosteTotal(Pdisp,Qe_opt,H_salto,index_turbina,L,Lazud,hazud,Lcanal);
Beneficios=Dolares_IngresadosAnuales;
```
- Se calcula el VAN con los datos de Vida Útil del proyecto “intVidaUtil” y la tasa de descuento “inttasaVAN”

```
VAN_Obtenido=[];
VAN_Obtenido=VAN(sum(Coste_Total), Dolares_IngresadosAnuales, intVidaUtil, inttasaVAN);
```
- En las líneas siguientes se consigue hacer que los valores de las variables de salida sean mostrados por pantalla.

```
////aquí reescribimos los resultados para que se muestren en pantalla
guientry1(11) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(D), "position",[I3+5,guih1-(11+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(11));
guientry1(12) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(Qe_opt), "position",[I3+5,guih1-(12+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(12));
guientry1(13) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(index_turbina), "position",[I3+5,guih1-(13+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(13));
guientry1(14) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(esp*1000), "position",[I3+5,guih1-(14+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(14));
guientry1(15) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(Eanual/1000000), "position",[I3+5,guih1-(15+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(15));
guientry1(16) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(Pmax/1000000), "position",[I3+5,guih1-(16+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(16));
guientry1(17) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(Beneficios), "position",[I3+5,guih1-(17+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(17));
guientry1(18) = uicontrol("parent",GUI, "style","edit","string",string(VAN_Obtenido), "position",[I3+5,guih1-(18+5)*20+guih1o,91,20],
"horizontalalignment","left","fontsize",14,"background",[.9 .9 .9],"tag",labels1(18));
```
- Lo próximo que se hará es obtener la gráfica Golpe de Ariete – Longitud y la gráfica Energía anual – Caudal de Equipamiento (Qe).
Para obtener la gráfica de Energía anual-Caudal de Equipamiento se realizará un rango de valores de Qe que utilizaremos como eje de abscisas.
El rango de valores de Qe se ha definido que contenga 10 valores que haremos pasar por las funciones anteriores hasta calcular la Energía anual asociada a un Qe determinado. Se podría representar la curva con más valores, pero esto ralentizaría la ejecución del programa.
En el bucle “for” se hacen los cálculos para cada “Qe” y se guardan los resultados de Energía anual generada en el array “Eanual”.
Si multiplicamos el array de “Eanual” por el precio de la energía conseguiremos los Beneficios asociados a cada Qe.
Los costes se podrán calcular con la función “CosteTotal”. Y el VAN se puede obtener de la misma forma con la función “VAN_Obtenido”.

```
//dibujamos la gráfica VAN-Diametro
Qe_X=linspace(0,Qe_opt+5,10);costes=[];BENEFICIO=[];ingresos=[];costes=[];Eanual=[];Ediaria=[];VAN_Obtenido=[];
for i=1:length(Qe_X)
    Friccion=[]; Locales=[]; PerdTotales=[]; Hn=[]; Vel=[];
    Qmt = Qe_X(i) * Qmt_Qe(index_turbina);
    Qturbinado = CalcularCaudalTurbinado(Qi,Qe_X(i),Qmt,Qserv);
```

```

Friccion=calculoPerd(Qturbinado,D,intRugAbs,0.00103,L);
Vel=Vel_Flujo(D,Friccion,L);
Locales=Perd_locales(Vel);//Perdidas locales valvula
PerdTotaes=Friccion+Locales;//mca
Hn=H_salto-PerdTotaes//Calculo de la altura Neta
Rend_turbina = CalcularRendimientoTurbina(Qturbinado,Qe_X(i),Q_Qe, rend(:,index_turbina));
Rend_otros = 0.9;
Rend_total = Rend_turbina * Rend_otros;
//Potencia útil
Pdisp= CalcularPotencia(Qturbinado, Hn);
Putil = Pdisp * Rend_total;
//Energía diaria
Ediaria = Putil * Periodo_funcionamiento;
//Energía anual
Eanual(i) = sum(Ediaria);
//Beneficio=Ingresos-Gastos
ingresos(i)=(1/1000)*intprecioEn*Eanual(i);
costes(i)=(1/1000)*CosteTotal(Pdisp,Qe_X(i),H_salto,index_turbina,L,Lazud,hazud,Lcanal);

```

- **Vamos a graficar únicamente los valores de VAN que sean positivos.**

```

aux(i)=VAN(costes(i), BENEFICIO(i), intVidaUtil, inttasaVAN);
if aux(i)>0 then
    VAN_Obtenido(i)=aux(i);
elseif aux(i)<=0 then
    VAN_Obtenido(i)=0;
end
end

```

- **Las siguientes líneas consisten en ejecutar la función “plot” para que la gráfica de Eanual vs Qe se ubique en la frame 3 de la interfaz y que la gráfica Golpe de Ariete vs Longitud se muestre en la frame 4**

```

//Incluimos la Grafica Eanual vs Qe
E=newaxes(my_cuadro3);
GA=newaxes(my_cuadro4);

plot(E, Qe_X', Eanual, "g")
title("Energía anual vs Qe","fontsize",4)
legend([VAN])
plot(GA, 1:1:L, GA_Micheaud,"r", 1:1:L, GA_Jouguet,"b")
legend(['Golpe de Ariete de Micheaud'; 'Golpe de Ariete de Jouguet'])
title("Curva de presiones","fontsize",4)
endfunction

```

Fichero “GUI_funciones.sci”

Scilab permite guardar las fórmulas en un fichero “.sci” de forma que podremos llamar a estas fórmulas en el fichero principal “.sce”, esto nos aporta mayor claridad en el código. Las funciones de costes (de Obra civil, de tubería forzada, de turbina, de Sistema eléctrico) han sido explicadas en la memoria, se trata de las funciones empíricas aportadas por el IDAE (Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía).

Función del Diámetro de Fahlbusch

Es una ecuación empírica del científico F.E. Fahlbusch (1982) y se obtiene un diámetro económico en función del caudal y de la potencia disponible.

```
function D=Fahlbusch(H, Q, rend)
    P=g*rend*Q*H*997;
    D=0.52*(H^(-0.14))*(0.001*P/H)^(0.42);
endfunction
```

Función del número de Reynolds

El número de Reynolds será necesario para calcular el coeficiente de fricción de Darcy.

```
function R=Reynolds(Q, D, nu)
    R=Q.*4/(%pi*D*nu);
Endfunction
```

Función del coeficiente de fricción de Darcy

Las pérdidas de carga por fricción se calcularán con la ecuación de Darcy, por tanto, será necesario calcular el coeficiente de Darcy.

```
function f=Darcy(D, Re, rugosidad_abs)//calculo coef Darcy
    f=0.25/([log10(rugosidad_abs/(3.7*D)+5.74/(Re^0.9))]^2);
endfunction
```

Función de las pérdidas por fricción

Con esta función Podemos calcular las pérdidas de carga para un determinado caudal.

```
function Hr=Perd_friccion(Q, D, f, L)//Formula Darcy-WeissBach
    for i=1:length(f)
        Vel(i)=4*Q(i)/(%pi*D^2);
        Hr(i)=f(i)*L*(Vel(i)^2)/(D*2*g);
    end
endfunction
```

Función de las pérdidas por fricción para array

Con esta función unimos la función del número de Reynolds, la función del coeficiente de Darcy y la de Pérdidas de carga para un caudal determinado. De forma que llamando a esta única función podremos calcular las pérdidas de carga para un rango de caudales determinados.

```
function perdTotal=calculoperd(Q, D, RugAbs, nu, L)
    for i=1:length(Q)
        R(i)=Reynolds(Q(i),D,nu);
        fi(i)=Darcy(D,R(i),RugAbs);
    end
    perdTotal=Perd_friccion(Q,D,fi,L);
endfunction
```

Función de la velocidad del flujo

La velocidad del flujo se utilizará para calcular las pérdidas de carga por singularidades.

```
function Vel=Vel_Flujo(D, hr, L)//Fórmula de Hazen-Williams (wikipedia)
    Vel=0.849*90*((D/4)^0.63)*((hr/L)^0.54);
endfunction
```

Función de pérdidas por singularidades

Calculamos las pérdidas en una válvula con coeficiente de pérdidas igual a 1.7

```
function Loc=Perd_locales(Vel)//calculo perdidas locales valvula
    Loc=1.7*(Vel^2)/(2*g);
endfunction
```

Función del Caudal turbinado

Con esta función se filtrará el array de caudales diarios, de forma que se tengan en cuenta el Caudal máximo turbinable que es el Caudal de Equipamiento, el Caudal Mínimo técnico y el Caudal ecológico. De esta forma obtendremos un array con el caudal que circulará por la turbina a lo largo del año.

```
function [Qturbinado]=CalcularCaudalTurbinado(Qi, Qe, Qmt, Qserv)
    n = size(Qi,'r');
    for i=1:n
        if Qi(i)>=(Qe+Qserv)
            Qturbinado(i)=Qe;
        end;
        if ((Qi(i)<=(Qe+Qserv)) && (Qi(i)>(Qmt+Qserv)))
            if Qi(i)>=Qe
                Qturbinado(i)=Qe;
            elseif Qi(i)<Qe
                Qturbinado(i)=Qi(i);
            end
        end;
        if Qi(i)<(Qmt+Qserv)
            Qturbinado(i)=0;
        end;
    end;
endfunction;
```

Función del cálculo de potencia

Con esta función obtendremos los kilovatios que generará un salto y una altura determinada.

```
function [Pbruta]=CalcularPotencia(Qturbinado, H)
    Pbruta = Qturbinado .* H * 9.81 * 997;
endfunction;
```

Función del Rendimiento de la turbina

Esta función se encargará de obtener una función continua de unos valores discretos de una curva de rendimientos de una turbina. Habiendo hecho esta interpolación, la función devolverá el valor correspondiente un determinado valor de caudal ("*Qturbinado*").

```
function [Rend_turbina]=CalcularRendimientoTurbina(Qturbinado, Qe, Q_Qe, rend_aux)
    Qaux = Qturbinado / Qe;
    dk = spline(Q_Qe, rend_aux);
    [Rend_turbina] = interp(Qaux, Q_Qe, rend_aux, dk, out_mode='CO');
endfunction;
```

Función del VAN

Esta función calcula el VAN correspondiente a los parámetros de entrada

```
function [van]=VAN(Inversion_Inicial, FlujoCajaAnual, VidaUtil, TipoInteres)
    for i=1:VidaUtil
        aux=FlujoCajaAnual/((1+TipoInteres/100)^i);
        van=van+aux;
    end
    van=-Inversion_Inicial+van;
endfunction
```

Función Objetivo. Cálculo de la Energía anual producida.

Esta es la función que se introducirá en el algoritmo genético de optimización. Incorpora los llamamientos a las otras funciones necesarias en el cálculo.

El parámetro de entrada “x” es un array de dimensión 2, que ha sido definido en los parámetros iniciales del algoritmo de optimización. Los elementos de este array serán los que varíen durante el proceso de optimización. Las restantes variables, “Qi”, “Qserv” y “Hutil” permanecerán invariantes durante este proceso.

```
function [Eanual]=CalcularEnergiaAnual(x, Qi, Qserv, Hutil)
    Qe=x(1); //x es el array con las variables de decision, x(1) es el Q de equipamiento
    index_turbina=x(2);
    index_turbina_aux = round(index_turbina);
    //Leemos la hoja del fichero Excel y obtenemos los datos correspondientes a los rendimientos(y grado de carga) y caudal
    minimo tecnico.
    [Value2,TextInd2] = xls_read(fd,Sheetpos(2));
    rend = Value2(2:22,2:4);
    Q_Qe = Value2(2:22,1);
    Qmt_Qe = Value2(3,7:9);
    //Definimos el caudal mínimo técnico
    Qmt = Qe * Qmt_Qe(index_turbina_aux);
    //Caudal turbinado
    Qturbinado = CalcularCaudalTurbinado(Qi,Qe,Qmt,Qserv);
    //Potencia bruta
    Pbruta= CalcularPotencia(Qturbinado, Hutil);
    //Rendimiento turbina
    Rend_turbina = CalcularRendimientoTurbina(Qturbinado,Qe,Q_Qe, rend(:,index_turbina_aux));
    //Rendimiento total
    Rend_otros = 0.9; //Aqui se incluye el rendimiento de generador, multiplicadora y otros elementos menores.
    Rend_total = Rend_turbina * Rend_otros;
    //Potencia útil
    Putil = Pbruta .* Rend_total;
    //Energía diaria
    Periodo_funcionamiento = 24;
    Ediaria = Putil * Periodo_funcionamiento;
    //Energía anual
    Eanual = - sum(Ediaria);

endfunction;
```

Función de costes de Obra civil

```
function C_1=CosteObraCiv(Lazud, hazud, Qe, Lcanal, Hutil)
    Cazud=(98*hazud^(2)+760)*Lazud; //Coste de Azud
    C_OT=8000*Qe^(0.75)+3000; //Coste Obra de Toma
    Cc=(195*Qe^(0.45)+10.*Lcanal); //Coste canal derivacion
    Ccarga=10500*Qe^(0.945)+2000; //Coste Camara Carga
    C_EC=95000*(Hutil^(0.046))*(Qe^(0.25)); //Coste Edificio
    C_1=Cazud+C_OT+Cc+Ccarga+C_EC;
Endfunction
```

Función de costes de tubería forzada

```
function Ctf=CosteTuberiaForzada(Qe, Long, Hu)
    A=[295 320 320 520 775; 0.45 0.528 0.645 0.748 0.776; 135 200 200 200 200]; //Coeficientes de aproximacion
    a=0;b=0;c=0
    if Hu>=100 && Hu<200 then
        a=A(1,2);b=A(2,2);c=A(3,2);
    elseif Hu >=200 && Hu<500 then
        a=A(1,3);b=A(2,3);c=A(3,3);
    elseif Hu >=500 && Hu<800 then
        a=A(1,4);b=A(2,4);c=A(3,3);
    elseif Hu >=800 then
        a=A(1,5);b=A(2,5);c=A(3,5);
    end
    Ctf=(a*Qe^(b)+c)*Long;
endfunction
```

Función de coste de la turbina

```
function CosteTG=CosteTurbina_Gen(P, Qe, Hutil, index_turbina)
    A=[120000 90000 90000; 0.25 0.2 0.2; 0.45 0.5 0.4];
    a=0;b=0;c=0;
    if index_turbina==1 then //Turbina Francis
        a=A(1,2);b=A(2,2);c=A(3,2);
        CTP=90000*(Hutil^0.2)*(Qe^0.5)
    elseif index_turbina==2 then //Turbina Kaplan
```

```

a=A(1,3);b=A(2,3);c=A(3,3);
CTP=90000*(Hutil^0.2)*(Qe^0.4)
elseif index_turbina==3 then//Turbina Pelton
a=A(1,1);b=A(2,1);c=A(3,1);
CTP=120000*(Hutil^0.25)*(Qe^0.45))
end
C_G=467000*(1-exp(-max(P)/6500));
CosteTG=sum(C_G)+CTP
endfunction

```

Función de costes de Sistema Eléctrico

```

function CSist=CosteSistElec(P)
C_trafo=183*(1-exp(-max(P)/6000))+2000;
C_sistElectGral=180000*(1+1/(1+exp(2*(1-max(P)/3600))));
CSist=sum(C_trafo)+sum(C_sistElectGral);
endfunction

```

Función de coste Total

Esta función consiste en el sumatorio de los costes. Para ello se llama a las 4 funciones de costes y se obtiene el sumatorio total.

```

function C_Total=CosteTotal(P, Qe, Hutil, index_turbina, Long, Lazud, hazud, Lcanal)
if P<=0 then
P=0
end
Co=CosteObraCiv(Lazud,hazud,Qe,Lcanal,Hutil);
CTub=CosteTuberiaForzada(Qe,Long,Hutil);
CT_Gen=CosteTurbina_Gen(P,Qe,Hutil,index_turbina);
CSist=CosteSistElec(P);
C_Total=Co+CTub+CT_Gen+CSist;
Endfunction

```

Datos del fichero Excel

Caudal diario

Los caudales diarios que se han empleado en el ejemplo son los siguientes:

día	Q (m3/s)	día	Q (m3/s)	día	Q (m3/s)	día	Q (m3/s)	día	Q (m3/s)	día	Q (m3/s)
1	11.05	62	3.05	123	1.68	184	1.02	245	0.74	306	0.5
2	9.7	63	2.98	124	1.65	185	1.01	246	0.74	307	0.49
3	9.14	64	2.93	125	1.65	186	1	247	0.73	308	0.49
4	8.91	65	2.9	126	1.64	187	1	248	0.71	309	0.49
5	8.61	66	2.89	127	1.63	188	1	249	0.71	310	0.49
6	8.59	67	2.82	128	1.61	189	0.99	250	0.71	311	0.48
7	8.56	68	2.82	129	1.59	190	0.97	251	0.7	312	0.48
8	8.54	69	2.81	130	1.59	191	0.97	252	0.69	313	0.48
9	8.4	70	2.79	131	1.59	192	0.97	253	0.68	314	0.48
10	8.23	71	2.78	132	1.59	193	0.96	254	0.68	315	0.47
11	7.32	72	2.75	133	1.56	194	0.95	255	0.68	316	0.47
12	7.05	73	2.74	134	1.55	195	0.95	256	0.67	317	0.47
13	6.87	74	2.68	135	1.55	196	0.95	257	0.67	318	0.47
14	6.82	75	2.65	136	1.52	197	0.94	258	0.66	319	0.47
15	6.79	76	2.65	137	1.46	198	0.94	259	0.66	320	0.47
16	6.55	77	2.63	138	1.46	199	0.94	260	0.65	321	0.46
17	6.43	78	2.63	139	1.46	200	0.93	261	0.65	322	0.46

18	6.09	79	2.59	140	1.45	201	0.92	262	0.65	323	0.46
19	6.06	80	2.58	141	1.44	202	0.92	263	0.64	324	0.45
20	5.97	81	2.51	142	1.44	203	0.91	264	0.64	325	0.45
21	5.87	82	2.48	143	1.44	204	0.9	265	0.64	326	0.45
22	5.86	83	2.48	144	1.42	205	0.9	266	0.64	327	0.44
23	5.75	84	2.45	145	1.39	206	0.89	267	0.64	328	0.44
24	5.75	85	2.45	146	1.39	207	0.88	268	0.64	329	0.44
25	5.64	86	2.44	147	1.35	208	0.88	269	0.63	330	0.43
26	5.6	87	2.44	148	1.35	209	0.88	270	0.63	331	0.43
27	5.24	88	2.44	149	1.32	210	0.87	271	0.63	332	0.43
28	5.15	89	2.42	150	1.28	211	0.87	272	0.63	333	0.43
29	5.02	90	2.32	151	1.27	212	0.87	273	0.63	334	0.43
30	4.83	91	2.31	152	1.27	213	0.86	274	0.62	335	0.42
31	4.79	92	2.3	153	1.27	214	0.86	275	0.61	336	0.42
32	4.49	93	2.29	154	1.26	215	0.86	276	0.61	337	0.42
33	4.37	94	2.28	155	1.25	216	0.85	277	0.61	338	0.42
34	4.23	95	2.26	156	1.23	217	0.85	278	0.6	339	0.41
35	4.23	96	2.21	157	1.22	218	0.85	279	0.6	340	0.41
36	4.2	97	2.19	158	1.21	219	0.84	280	0.59	341	0.41
37	4.19	98	2.19	159	1.21	220	0.83	281	0.59	342	0.41
38	4.07	99	2.19	160	1.2	221	0.83	282	0.59	343	0.4
39	4.03	100	2.16	161	1.2	222	0.83	283	0.59	344	0.4
40	3.99	101	2.13	162	1.19	223	0.82	284	0.58	345	0.39
41	3.92	102	2.12	163	1.19	224	0.82	285	0.58	346	0.39
42	3.86	103	2.12	164	1.17	225	0.82	286	0.57	347	0.39
43	3.84	104	2.09	165	1.16	226	0.82	287	0.57	348	0.39
44	3.83	105	2.08	166	1.16	227	0.82	288	0.57	349	0.39
45	3.83	106	2.06	167	1.15	228	0.81	289	0.56	350	0.38
46	3.79	107	2.06	168	1.14	229	0.81	290	0.56	351	0.38
47	3.78	108	2.02	169	1.13	230	0.8	291	0.56	352	0.36
48	3.7	109	2.01	170	1.12	231	0.78	292	0.54	353	0.36
49	3.68	110	1.97	171	1.11	232	0.77	293	0.54	354	0.35
50	3.56	111	1.96	172	1.11	233	0.77	294	0.54	355	0.34
51	3.45	112	1.94	173	1.1	234	0.77	295	0.54	356	0.34
52	3.43	113	1.91	174	1.09	235	0.77	296	0.54	357	0.34
53	3.42	114	1.87	175	1.09	236	0.76	297	0.53	358	0.33
54	3.39	115	1.84	176	1.07	237	0.76	298	0.53	359	0.32
55	3.2	116	1.83	177	1.07	238	0.76	299	0.53	360	0.32
56	3.17	117	1.82	178	1.07	239	0.76	300	0.52	361	0.32
57	3.13	118	1.8	179	1.07	240	0.75	301	0.52	362	0.31
58	3.11	119	1.76	180	1.07	241	0.75	302	0.52	363	0.31
59	3.11	120	1.75	181	1.05	242	0.75	303	0.52	364	0.3
60	3.09	121	1.74	182	1.03	243	0.75	304	0.52	365	0.29
61	3.07	122	1.68	183	1.03	244	0.74	305	0.51		

Tabla 3-A Caudal diario a lo largo de un año hidrológico utilizado en el ejemplo explicativo

Rendimiento de la turbina

Los datos de rendimiento son los siguientes:

Q/Qe	Francis	Kaplan	Pelton
0	0	0	0
0.05	0	0	0
0.1	0.02	0	0.2
0.15	0.15	0	0.55
0.2	0.35	0.15	0.78
0.25	0.5	0.5	0.84
0.3	0.58	0.73	0.85
0.35	0.65	0.78	0.86
0.4	0.71	0.81	0.87
0.45	0.76	0.84	0.88
0.5	0.8	0.86	0.89
0.55	0.82	0.87	0.89
0.6	0.85	0.88	0.89
0.65	0.86	0.89	0.89
0.7	0.86	0.89	0.89
0.75	0.87	0.89	0.89
0.8	0.88	0.9	0.9
0.85	0.89	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.95	0.9	0.9	0.9
1	0.9	0.9	0.9

Tabla 4-A Valores de rendimiento en función del grado de carga, Q/Qe

Caudal mínimo técnico

Los caudales mínimos técnicos considerados en el programa son los siguientes:

Caudal mínimo técnico Qmt/Qe			
	Francis	Kaplan	Pelton
Qmt	0.35	0.22	0.1

Tabla 5-A Caudal mínimo técnico de los 3 tipos de turbina

Cálculo de Costes

Estas son las fórmulas empíricas publicadas por el IDAE (Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía). Estas fórmulas son las que se han incorporado al programa para el cálculo de costes.

Costes de los distintos elementos en una central hidroeléctrica	
Coste del Sistema Eléctrico General	$C_{se} = 180000 \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + e^{2 \cdot \left(1 - \frac{P}{3600} \right)}} \right)$
Coste Transformador de potencia	$C_{trafo} = 183000 \cdot \left(1 - e^{-\frac{P}{6000}} \right) + 2000$
Coste Generador Síncrono	$C_{gen} = 467000 \cdot \left(1 - e^{-\frac{P}{6500}} \right)$
Coste Turbina Kaplan	$C_{TKaplan} = 90000 \cdot Hu^{0.2} \cdot Qe^{0.4}$
Coste Turbina Francis	$C_{TFrancis} = 90000 \cdot Hu^{0.2} \cdot Qe^{0.5}$
Coste Turbina Pelton	$C_{TPelton} = 90000 \cdot Hu^{0.25} \cdot Qe^{0.45}$

Tabla 6-A Fórmulas de cálculo empírico de costes del IDAE